

Máster Universitario en Ingeniería de Máquinas y Transportes
Curso académico 2018-2019

Trabajo Fin de Máster

**“ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD EN RECTA DE
UN TREN DE CERCANÍAS”**

Ignacio Álvarez Castrillo

Tutor:

Alejandro Bustos Caballero

Septiembre 2019; Leganés, Madrid



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento
– No Comercial – Sin Obra Derivada**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quería agradecerle a mi tutor, Alejandro Bustos Caballero, toda la atención y ayuda que he recibido por su parte para poder conseguir realizar con éxito no sólo mi trabajo de fin de máster, sino también mi trabajo de fin de grado.

Agradecer a mi familia y a mis amigos, por ser los mejores compañeros de vida que se pueden tener.

Me gustaría en especial dedicarle este proyecto a mi novia Sandra, por apoyarme incondicionalmente, por levantarme el ánimo siempre que lo he necesitado y por hacer que mi vida sea más feliz.

RESUMEN

La ingeniería ferroviaria se ha embarcado desde el comienzo de la historia del ferrocarril en la búsqueda por conseguir vehículos de alta velocidad, gran capacidad de carga, alto confort para sus pasajeros y, sobre todo en los últimos tiempos, una emisión de contaminantes lo más baja posible. Para lograrlo, los avances realizados en materia de *estabilidad* son fundamentales.

El presente proyecto consiste en el estudio dinámico de la estabilidad del tren de cercanías de la *Serie 446* diseñado por la empresa CAF y utilizado por RENFE para dar servicio a desplazamientos de corta y media distancia en la Comunidad Autónoma de Madrid.

En dicho estudio se calculará la *velocidad crítica* a la que se puede desplazar el tren antes de perder la estabilidad y comenzar el *movimiento de lazo* que podría dar lugar al descarrilamiento del mismo. Además, se analizará en detalle la naturaleza del comportamiento lateral en recta del vehículo a través de la obtención de las variables de posición, velocidad y aceleración laterales tanto de los ejes, como del bastidor de los bogies del tren; y se hallarán los *ciclos límite*, *planos de fase* y las curvas que relacionan la máxima amplitud de desplazamiento lateral con la velocidad de circulación del tren. También se estudiará cómo afecta a los resultados el estado de carga del tren y la realización de modificaciones en los parámetros que determinan la suspensión de los bogies.

Para la realización del proyecto ha sido necesario el modelado en CAD de los elementos que conforman el tren a través del programa *PTC CREO Parametric*; y la implementación y simulación del comportamiento tren a través del programa *Universal Mechanism*.

PALABRAS CLAVE

Estabilidad, Serie 446, velocidad crítica, movimiento de lazo, ciclos límite, planos de fase, PTC CREO Parametric, Universal Mechanism.

ABSTRACT

Railway engineering has embarked since the beginning of the railway history in the search for high-speed vehicles, with a high load capacity, a great comfort for its passengers and, especially in recent times, a lower emission of pollutants as possible. To achieve it, the progress made in terms of *stability* is fundamental.

This Project consists in the dynamic study of the stability of the *446 Series train* powered by CAF and used by RENFE for short and medium distance services around the territory of Madrid.

In this study, the *critical speed*, at which the train can travel before losing its stability and starting the *hunting oscillation* that could lead to its derailment, will be calculated. In addition, the nature of the lateral behavior of the vehicle will be analyzed in detail by the calculation of the lateral position, speed and acceleration variables in the axis and in the bogies of the train; and the *limit cycles*, *phase planes* and the curves that compare the maximum amplitude of lateral displacement with the speed of the train. It will also be studied how it affects to the results the train load's status and the modifications in the parameters that determine the suspension of the bogies.

For the realization of the Project it has been necessary the CAD modeling of the elements that form the train by the software *PTC CREO Parametric*; and the implementation and simulation of the train behavior by the software *Universal Mechanism*.

KEY WORDS

Stability, 446 Series train, critical speed, hunting oscillation, limit cycles, phase planes, PTC CREO Parametric, Universal Mechanism.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	5
<i>PALABRAS CLAVE</i>	5
ABSTRACT	7
<i>KEY WORDS</i>	7
ÍNDICE.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	21
1. INTRODUCCIÓN	23
1.1. ÁMBITO Y MOTIVACIÓN	24
1.2. OBJETIVOS	26
1.3. ETAPAS DEL PROYECTO	27
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	29
1.5. MARCO REGULADOR	31
2. COMPLEMENTOS TEÓRICOS.....	32
2.1. EL TREN DE LA SERIE 446	32
2.2. LA SUSPENSIÓN DEL TREN.....	34
2.3. EL MOVIMIENTO DE LAZO	37
2.4. CICLOS LÍMITE Y PLANOS DE FASE	38

3.	DESCRIPCIÓN DE HERRAMIENTAS EMPLEADAS	41
3.1.	PTC CREO PARAMETRIC.....	42
3.2.	UNIVERSAL MECHANISM	43
4.	METODOLOGÍA	47
4.1.	OBTENCIÓN DE LOS DISEÑOS EN CAD Y DE DATOS DE RELEVANCIA.....	49
4.2.	MONTAJE E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN UM.....	55
4.3.	PREPARACIÓN Y REALIZACIÓN DE LAS SIMULACIONES.	74
5.	RESULTADOS.....	84
5.1.	PRIMER ENSAYO: COCHE REMOLQUE EN VACÍO.	86
5.2.	SEGUNDO ENSAYO: COCHE MOTOR EN VACÍO.	91
5.3.	TERCER ENSAYO: COCHE REMOLQUE A MEDIA CARGA.....	96
5.4.	CUARTO ENSAYO: COCHE MOTOR A MEDIA CARGA.....	101
5.5.	QUINTO ENSAYO: COCHE REMOLQUE CON CARGA MÁXIMA.	106
5.6.	SEXTO ENSAYO: COCHE MOTOR CON CARGA MÁXIMA.....	111
5.7.	SÉPTIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES TRABAJANDO AL 70%.....	116
5.8.	OCTAVO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES TRABAJANDO AL 80%.....	121
5.9.	NOVENO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES TRABAJANDO AL 90%.....	126
5.10.	DÉCIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES TRABAJANDO AL 130%.....	131

5.11. UNDÉCIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE CON RESORTES TRABAJANDO AL 70%.....	136
5.12. DUODÉCIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE CON RESORTES TRABAJANDO AL 80%.....	141
5.13. DÉCIMO TERCER ENSAYO: COCHE REMOLQUE CON RESORTES TRABAJANDO AL 90%.....	146
5.14. DÉCIMO CUARTO ENSAYO: COCHE REMOLQUE CON RESORTES TRABAJANDO AL 110%.....	151
5.15. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	156
6. PRESUPUESTO	161
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	164
7.1. CONCLUSIONES	164
7.2. TRABAJOS FUTUROS	166
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Movimiento de Lazo. [2]	23
Figura 1.2: Emisiones de CO2 Procedentes del Transporte de Pasajeros. [4].....	25
Figura 2.1: Tren de la Serie 446 en Funcionamiento. [5].....	32
Figura 2.2: Partes del Bogie. [7].....	35
Figura 2.3: Bogie de la Serie 446.	36
Figura 2.4: Esquema del Bogie de la Serie 446. [8]	36
Figura 2.5: Representación del Movimiento de Lazo. [9]	37
Figura 2.6: Ciclo Límite. [11].....	38
Figura 2.7: Ejemplos de Ciclos Límite.....	39
Figura 2.8: Ciclo Estable (A) y Ciclo Inestable (B). [10].....	39
Figura 2.9: Sistemas no Lineales Caóticos. [11]	40
Figura 3.1: Publicidad Creo Parametric. [13].....	42
Figura 4.1: Esquema de la Metodología del Proyecto.....	47
Figura 4.2: Vista Isométrica del Eje en Creo.....	50
Figura 4.3: Vista de Planta del Eje en Creo.....	51
Figura 4.4: Caja de Grasa 1.	52
Figura 4.5: Caja de Grasa 2.	52
Figura 4.6: Bastidor del Bogie en CAD.	53
Figura 4.7: Parámetros Eje de Ruedas en UM.	56

Figura 4.8: Ejes de Ruedas en UM.	57
Figura 4.9: Caja_ID en UM.	58
Figura 4.10: Parámetros Caja_ID.	59
Figura 4.11: Unión del eje delantero y la caja izquierda delantera.	60
Figura 4.12: Parámetros de la unión entre el eje delantero y la Caja_ID.	60
Figura 4.13: Montaje ejes y cajas de grasa en UM.	61
Figura 4.14: Parámetros Bastidor del Bogie en UM.	62
Figura 4.15: Conjunto Ejes - Cajas de grasa - Bastidor en UM.	63
Figura 4.16: Suspensión Primaria Serie 446. [8]	64
Figura 4.17: Parámetros Resortes Helicoidales UM.	65
Figura 4.18: Muelle Interior de la Caja_IT.	66
Figura 4.19: Colocación de Resortes en el Modelo en UM.	66
Figura 4.20: Parámetros Amortiguador en UM.	68
Figura 4.21: Amortiguador Izquierdo Trasero en UM.	68
Figura 4.22: Parámetros Guía Exterior Izquierda Trasera en UM.	69
Figura 4.23: Vista Isométrica Bogie de la Serie 446 en UM.	72
Figura 4.24: Vistas Bogie de la Serie 446 en UM.	73
Figura 4.25: Selección de la velocidad como parámetro a modificar.	77
Figura 4.26: Irregularidades en UM.	78
Figura 4.27: Irregularidad lateral g10_20.	79
Figura 4.28: Selección del Tipo de Vía.	79
Figura 4.29: Perfil de las Ruedas y de los Carriles.	80

Figura 4.30: Parámetros de Integración.....	81
Figura 4.31: Lista de Variables de Cálculo.	81
Figura 4.32: Proceso de Simulación.	82
Figura 4.33: Serie 446 en UM Simulate.	82
Figura 5.1: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 1.....	86
Figura 5.2: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 1.	87
Figura 5.3: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 1.	87
Figura 5.4: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 1.	88
Figura 5.5: Plano de Fase a Velocidad Crítica (40 m/s) del Ensayo 1.	88
Figura 5.6: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 1.	89
Figura 5.7: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 1.....	89
Figura 5.8: Posición Lateral VS Distancia Recorrida de Ensayo 2.	91
Figura 5.9: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 2.	92
Figura 5.10: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 2.	92
Figura 5.11: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 2.	93
Figura 5.12: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 2.	93
Figura 5.13: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 2.	94
Figura 5.14: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 2.....	94
Figura 5.15: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 3.....	96
Figura 5.16: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 3.	97
Figura 5.17: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 3.	97
Figura 5.18: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 3.	98

Figura 5.19: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 3.	98
Figura 5.20: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 3.	99
Figura 5.21: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 3.....	99
Figura 5.22: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 4.....	101
Figura 5.23: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 4.	102
Figura 5.24: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 4.	102
Figura 5.25: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 4.	103
Figura 5.26: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 4.	103
Figura 5.27: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 4.	104
Figura 5.28 Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 4....	104
Figura 5.29: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 5.....	106
Figura 5.30: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 5.	107
Figura 5.31: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 5.	107
Figura 5.32: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 5.	108
Figura 5.33: Plano de Fase a Velocidad Crítica (44 m/s) del Ensayo 5.	108
Figura 5.34: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 5.	109
Figura 5.35: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 5...	109
Figura 5.36: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 6.....	111
Figura 5.37: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 6.	112
Figura 5.38: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 6.	112
Figura 5.39: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 6.	113
Figura 5.40: Plano de Fase a Velocidad Crítica (45 m/s) del Ensayo 6.	113

Figura 5.41: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 6.	114
Figura 5.42: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 6... ..	114
Figura 5.43: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 7.....	116
Figura 5.44: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 7.	117
Figura 5.45: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 7.	117
Figura 5.46: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 7.	118
Figura 5.47: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 7.	118
Figura 5.48: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 7.	119
Figura 5.49: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 7... ..	119
Figura 5.50: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 8.....	121
Figura 5.51: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 8.	122
Figura 5.52: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 8.	122
Figura 5.53: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 8.	123
Figura 5.54: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 8.	123
Figura 5.55: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 8.	124
Figura 5.56: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 8... ..	124
Figura 5.57: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 9.....	126
Figura 5.58: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 9.	127
Figura 5.59: aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 9.	127
Figura 5.60: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 9.	128
Figura 5.61: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 9.	128
Figura 5.62: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 9.	129

Figura 5.63: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 9...	129
Figura 5.64: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 10.....	131
Figura 5.65: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 10.	132
Figura 5.66: aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 10.	132
Figura 5.67: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 10.	133
Figura 5.68: Plano de Fase a Velocidad Crítica (44 m/s) del Ensayo 10.	133
Figura 5.69: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 10.	134
Figura 5.70: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 10.	134
Figura 5.71: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 11.....	136
Figura 5.72: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 11.	137
Figura 5.73: aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 11.	137
Figura 5.74: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 11.	138
Figura 5.75: Plano de Fase a Velocidad Crítica (42 m/s) del Ensayo 11.	138
Figura 5.76: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 11.	139
Figura 5.77: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 11.	139
Figura 5.78: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 12.....	141
Figura 5.79: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 12.	142
Figura 5.80: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 12.	142
Figura 5.81: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 12.	143
Figura 5.82: Plano de Fase a Velocidad Crítica (42 m/s) del Ensayo 12.	143
Figura 5.83: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 12.	144
Figura 5.84: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 12.	144

Figura 5.85: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 13.	146
Figura 5.86: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 13.	147
Figura 5.87: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 13.	147
Figura 5.88: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 13.	148
Figura 5.89: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 13.	148
Figura 5.90: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 13.	149
Figura 5.91: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 13.	149
Figura 5.92: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 14.	151
Figura 5.93: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 14.	152
Figura 5.94: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 14.	152
Figura 5.95: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 14.	153
Figura 5.96: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 14.	153
Figura 5.97: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 14.	154
Figura 5.98: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 14.	154
Figura 5.99: Velocidad Crítica VS Estado de Ocupación.	157
Figura 5.100: Velocidad Descarrilamiento VS Estado de Ocupación.	157
Figura 5.101: Gráfico de Dispersión Velocidades de Estudio (m/s) VS Carga en Bogie (N).	158
Figura 5.102: Velocidades de Estudio (m/s) VS Carga en Bogie (N).	158
Figura 5.103: Velocidades de Estudio (m/s) VS Trabajo Amortiguadores (%).	159
Figura 5.104: Velocidades de Estudio (m/s) VS Trabajo Muelles (%).	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características Técnicas de la Serie 446.	33
Tabla 2: Módulos de Universal Mechanism. [14]	43
Tabla 3: Velocidades Crítica y de Funcionamiento Según Ocupación.	156
Tabla 4: Coste del equipo informático empleado.....	162
Tabla 5: Coste del software informático empleado	162
Tabla 6: Coste de personal empleado	163
Tabla 7: Coste total del proyecto.....	163

1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad en vehículos que se desplazan sobre raíles es de difícil consecución, ya que debido a la conicidad de los perfiles de las ruedas, a la falta de paralelismo entre carriles o a la propia inercia de los trenes puede aparecer un movimiento de lazo (Hunting Oscillation) que puede dar lugar al descarrilamiento del ferrocarril. Por lo tanto, en caso de haber una desalineación entre el eje y las ruedas, causada por una imperfección en la vía por ejemplo, el tren comenzará a desplazarse con un movimiento en forma de “S” similar a una forma sinusoidal [1]. En la Figura 1.1 se puede observar una representación gráfica del movimiento de lazo.

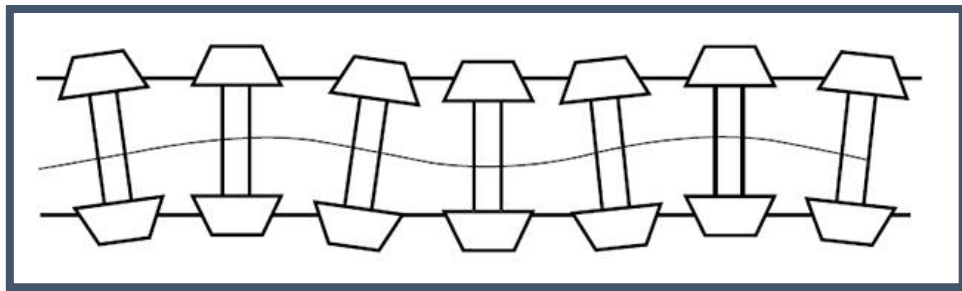


Figura 1.1: Movimiento de Lazo. [2]

Este movimiento se da a partir de cierta velocidad (Velocidad Crítica) y depende directamente de las condiciones iniciales de circulación en las que se encuentra el vehículo. Puede presentarse de diferentes formas, como ciclo límite, con un comportamiento de bifurcación o, en algunos casos, de manera caótica y totalmente impredecible [3].

Por lo tanto la confección de la suspensión del tren será fundamental para intentar mejorar la respuesta frente a estas inestabilidades y así optimizar al máximo la velocidad a la que puede circular el vehículo y el confort de los pasajeros.

1.1. ÁMBITO Y MOTIVACIÓN

En la actualidad, el cambio climático provoca una gran preocupación en gran parte de la sociedad. Esto crea un conflicto entre la búsqueda del crecimiento económico y tecnológico a toda costa y la reducción de la emisión de contaminantes para lograr la sostenibilidad del medio ambiente. En España el sector transporte genera en torno al 25% de los gases de CO_2 que se emiten a la atmósfera.

La reducción de la contaminación generada en el transporte de pasajeros y mercancías se puede abordar principalmente desde dos puntos de vista:

- La utilización de energías combustibles lo más limpias posibles. Las energías renovables emiten menos gases contaminantes en fases de producción.
- La reducción de emisiones de contaminantes por pasajero y kilómetro. Esto se puede conseguir utilizando medios de transporte que requieran menor energía para su funcionamiento, consiguiendo vehículos más ligeros, o a través de la optimización de la capacidad de pasajeros que pueden ser desplazados en los mismos.

En la Figura 1.2 se pueden observar las emisiones de CO_2 procedentes del transporte de pasajeros en función de los medios de transporte más utilizados (el tren, el autobús, el coche y el avión respectivamente). En ella se ve como el tren es con gran diferencia el vehículo menos contaminante, generando menos del 5% de Dióxido de Carbono que el avión y un 13% del que emite el automóvil.

Por tanto, se puede afirmar claramente que un buen punto de partida para aminorar la polución debida al sector transporte será fomentar el desplazamiento de pasajeros y mercancías en ferrocarril y promover que este sea el vehículo más utilizado.

La llegada de los trenes de Alta Velocidad a España ha supuesto un ahorro de 12,9 millones de toneladas de CO_2 en sus 25 años en actividad. Para conseguir que el tren sea el vehículo más utilizado, y se imponga frente a sus competidores más contaminantes, se deben mejorar la velocidad de servicio y el confort de sus pasajeros.

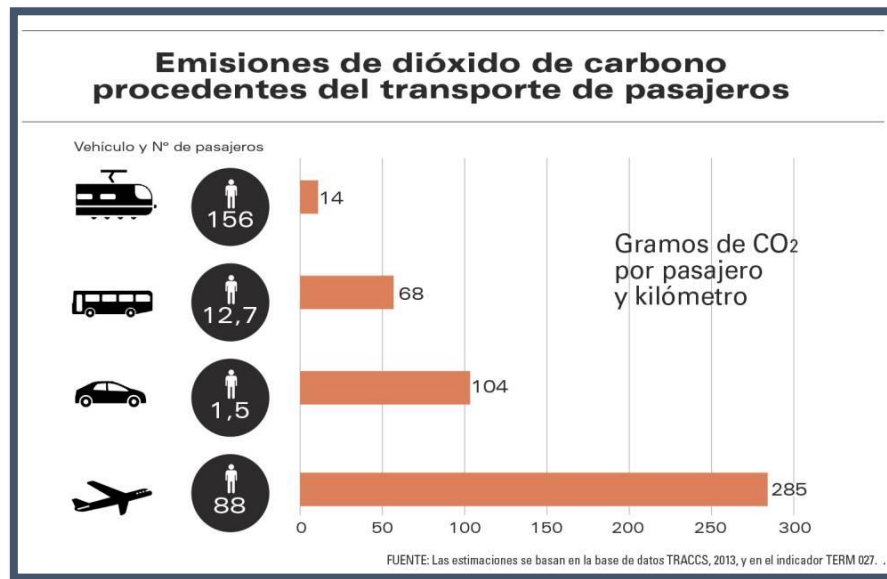


Figura 1.2: Emisiones de CO₂ Procedentes del Transporte de Pasajeros. [4]

Por lo tanto, parte de la motivación de este proyecto consiste en analizar el comportamiento de un tren de cercanías con la finalidad de conocer cómo mejorar la estabilidad del mismo y así poder mejorar el confort de los viajeros y la velocidad máxima que se puede alcanzar.

Por otro lado, si se analiza la motivación del proyecto desde un punto de vista económico, hay que tener en cuenta que el sector del ferrocarril es un negocio que mueve miles de millones de euros cada año en el mundo. España es puntera en dicho sector, ya que en ella se realiza buena parte del diseño y fabricación ferroviaria mundial. Además dos de las empresas más importantes a nivel mundial, como son CAF y Talgo, son españolas.

La realización de simulaciones por ordenador como las que se llevan a cabo en este proyecto podría suponer una grandísima reducción en los tiempos y costes de diseño del producto final, ya que permiten conocer el comportamiento que el tren va a tener antes de que este haya sido fabricado y físicamente probado.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es el análisis de la estabilidad lateral en recta del tren de la serie 446 de Renfe y, específicamente, de sus bogies.

La consecución de este objetivo principal implica la superación exitosa de una serie de objetivos secundarios, expuestos a continuación:

- Diseño en CAD de los ejes montados, las cajas de grasa y el bastidor de los bogies del tren; y la obtención de los valores de la masa, la posición del centro de gravedad y la matriz de los momentos de inercia de dichos elementos.
- Implementación del modelo bogie del tren de la Serie 446 a través del software Universal Mechanism.
- Simulación del comportamiento en recta del vehículo ferroviario.
- Cálculo de la velocidad crítica de los coches motor y remolque del vehículo en distintas condiciones de carga. A saber, vehículo en tara, con ocupación media y con ocupación máxima de pasajeros.
- Cálculo de la velocidad crítica del tren cuando se modifican los parámetros de rigidez y amortiguamiento de la suspensión primaria. Para ello se definirán convenientemente los valores de los parámetros con los que realizar las simulaciones.
- Obtención de los valores de la posición, velocidad y aceleración lateral de los centros de masa de los ejes y bogies del tren para cada caso en función de la velocidad de circulación.
- Análisis de los ciclos límite, planos de fase y las curvas que relacionan la amplitud de desplazamiento lateral con la velocidad de circulación del tren para cada caso.

1.3. ETAPAS DEL PROYECTO

La realización del proyecto se ha llevado a cabo a través de la sucesión de una serie de etapas:

1. Investigación previa y definición del proyecto:

En esta etapa se decide que el tema del proyecto fuese un estudio de la estabilidad en recta del tren de la Serie 446 de cercanías. Para ello es fundamental la elección del software de simulación a utilizar, ya que esta limitaría en gran medida el abanico de posibilidades de cara a orientar el estudio y los límites del proyecto. Se resuelve que el programa ideal para la simulación del comportamiento del tren sería Universal Mechanism. Tras la realización de una investigación previa tanto del tema como del programa se definen los objetivos del estudio.

2. Diseño en CAD de los elementos del tren necesarios para la posterior simulación:

Se parte como base de los diseños en CAD del bastidor de los bogies, los ejes de las ruedas y las cajas de grasa del tren; realizado por el mismo autor que este proyecto para el Trabajo de Fin de Grado “Análisis de las Vibraciones de un Bogie Ferroviario ante Excitación Genérica”. Sobre estos diseños, efectuados a través del software PTC CREO Parametric, se realizan una serie de simplificaciones para facilitar su carga a través de Universal Mechanism. Además se obtendrán los valores de la masa, posición del centro de gravedad y la matriz de los momentos de inercia de las diferentes partes del tren.

3. Construcción del modelo en Universal Mechanism:

En esta etapa se realiza la implementación del tren. Para ello se establecen las conexiones necesarias entre las partes del vehículo y se imponen las condiciones de contorno pertinentes.

4. Simulación del comportamiento en recta del ferrocarril.

Se efectúan las simulaciones numéricas de acuerdo a las condiciones definidas en la metodología.

5. Obtención y análisis de los resultados obtenidos para cada caso de estudio.

Una vez simulado el comportamiento del tren para cada ensayo a estudiar se extraen los datos necesarios de los resultados para poder efectuar con éxito el análisis.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento está conformado por los siguientes capítulos:

1. Introducción.

Para comenzar este capítulo se introduce el tema base del proyecto. Posteriormente se presenta el ámbito y la motivación de este Trabajo de Fin de Máster. A continuación se presentan los objetivos del estudio, las etapas que han sido llevadas a cabo para su realización y la estructura que presentara el informe. Para terminar el capítulo se tratará el marco regulador que envuelve el trabajo.

2. Complementos teóricos.

En este capítulo se realiza una pequeña profundización en materia teórica de conocimientos claves de cara a la comprensión del proyecto.

3. Descripción de herramientas empleadas.

Este capítulo es utilizado para presentar los softwares utilizados en la realización del proyecto, el programa de diseño PTC CREO Parametric y el programa de simulación Universal Mechanism.

4. Metodología.

El capítulo muestra algunos proyectos a tener en cuenta como antecedentes del proyecto, el planning que se ha seguido para su consecución y los resultados esperados. Además, se explican en detalle los pasos seguidos a la hora de realizar la parte técnica del trabajo.

5. Resultados.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada simulación. También en él se realizará el análisis y comparación de las soluciones obtenidas para cada caso de estudio.

6. Presupuesto.

En este capítulo se presenta el cálculo del coste económico que ha supuesto el desarrollo del TFM.

7. Conclusiones y trabajos futuros.

Se desarrollan las conclusiones del trabajo y se aportan ideas sobre la temática a basar para futuros Trabajos de Fin de Grado o de Trabajos de Fin de Máster que tomen este TFM como antecedente.

8. Referencias bibliográficas.

Este capítulo presenta las referencias bibliográficas consultadas para la confección del proyecto.

1.5. MARCO REGULADOR

Este apartado trata la legislación a la que está sujeto el presente proyecto.

En primer lugar cabe destacar que este es un Trabajo de Fin de Máster con finalidad investigadora, lo cual inhibe de tener que seguir normativa alguna a la hora de su realización. En caso de que este trabajo diera lugar a futuros proyectos, en los que se realizase el análisis de estabilidad de un tren de manera oficial con fines industriales y/o comerciales, sí que sería necesario seguir la normativa UNE relacionada con estos estudios y poder cumplir así las directivas europeas aplicables. De todas formas, no se ha encontrado norma UNE alguna que aplique a este caso de estudio en concreto.

En segundo lugar, para la realización de este proyecto se ha utilizado información confidencial. Esta información es la Norma Técnica de Mantenimiento NTM.4461.200.01 del bogie de la Serie 446. Este documento fue cedido por RENFE a la Universidad Carlos III de Madrid y contiene los planos del bogie y los procedimientos a seguir de cara a su mantenimiento. Para proteger el documento se ha firmado un acuerdo de confidencialidad en orden a no revelar esta información y, por lo tanto, estos planos y procedimientos no están presentes en el informe del trabajo.

Por último, recalcar que esta obra posee el sello Creative Commons, por el cual está permitida la utilización de esta obra para fines de ámbito no lucrativo. La finalidad de la utilización de la marca Creative Commons será facilitar la difusión del conocimiento. El uso de la información aquí recogida deberá ser citado de manera conveniente y así aportar al autor del crédito merecido.

2. COMPLEMENTOS

TEÓRICOS

2.1. EL TREN DE LA SERIE 446

Las unidades de trenes de las Series 446 y 447, y su prototipo la Serie 445, conforman la reserva de trenes eléctricos más numerosa adquirida por RENFE. La Serie 446 es un tren de cercanías cuya finalidad es el transporte de pasajeros en las proximidades de núcleos urbanos como la Comunidad de Madrid.



Figura 2.1: Tren de la Serie 446 en Funcionamiento. [5]

La fabricación mecánica de la serie fue realizada por las empresas CAF, Macosa y MTM; mientras que el desarrollo de los dispositivos eléctricos lo desarrollaron Cenemesa, Conelec y Melco. Un total de 170 unidades fueron fabricadas y entregadas a RENFE entre 1989 y 1993. [5]

En la actualidad se encuentran en funcionamiento 167 unidades, ya que 3 unidades quedaron inutilizables debido a los atentados terroristas del 11 de marzo de 2004. En la Tabla 1 se pueden observar las principales características técnicas del tren.

Tabla 1: Características Técnicas de la Serie 446.

SERIE 446	
Parque (construido/en activo)	170/167
Años de recepción	1989-1993
Composición	M-R-M
Ancho de vía	1668 mm
Masa en vacío	167 t
Potencia continua	2400 kW
Velocidad máxima	100 km/h
Tensión de alimentación	3 kV cc.
Freno neumático	Aire Comprimido
Otros frenos	Regenerativo y Reostático
Plazas sentadas / totales	240/759
Tipo de servicio	Cercanías

Otros datos del tren de la Serie 446 de especial relevancia para la realización del proyecto son las taras de los coches en vacío (61,2 t el Coche Motor y 44,2 t el Coche Remolque), el número de plazas totales de cada coche (237 pasajeros en el Coche Motor y 250 en el Coche Remolque) y la masa de los bogies (12,8 t cada bogie motor y 6,95 t cada bogie portador). Cada coche poseerá un total de dos bogies.

2.2. LA SUSPENSIÓN DEL TREN

La suspensión de un tren es el conjunto de elementos del mismo que se encarga de la realización de las siguientes funciones [6]:

- Transmisión de esfuerzos estáticos y cuasiestáticos (Peso, fuerza centrífuga en curva,...).
- Protección del bastidor del bogie y la caja del tren frente a golpes o aceleraciones elevadas.
- Mejorar el confort de los pasajeros.
- Aportar mayor seguridad frente al descarrilo.
- Evitar resonancias acústicas entre los elementos del tren.

Además, la suspensión del tren puede ser de dos tipos según su finalidad:

- Suspensión primaria: Situada entre los ejes de las ruedas y los bastidores de los bogies.
- Suspensión secundaria: Situada entre los bastidores de los bogies y las cajas del tren.

El bogie es un elemento rotativo del tren al que van acoplados dos o más ejes de ruedas. Es el encargado de la realización de las labores de amortiguación y suspensión. El bastidor del bogie está unido por medio de la suspensión primaria con los ejes, y por medio de la secundaria con la caja.

En la Figura 2.2 se pueden observar las partes de un bogie. En ella se ve que los ejes de las ruedas están conectadas por medio de rodamientos con las cajas de grasa. La suspensión primaria está compuesta por resortes helicoidales, amortiguadores de fricción y unas bielas a base de guías que conectan las cajas de grasa con el bastidor del bogie. Por último, una suspensión secundaria formada por dos balonas neumáticas unirá el bastidor del bogie con la caja del tren.

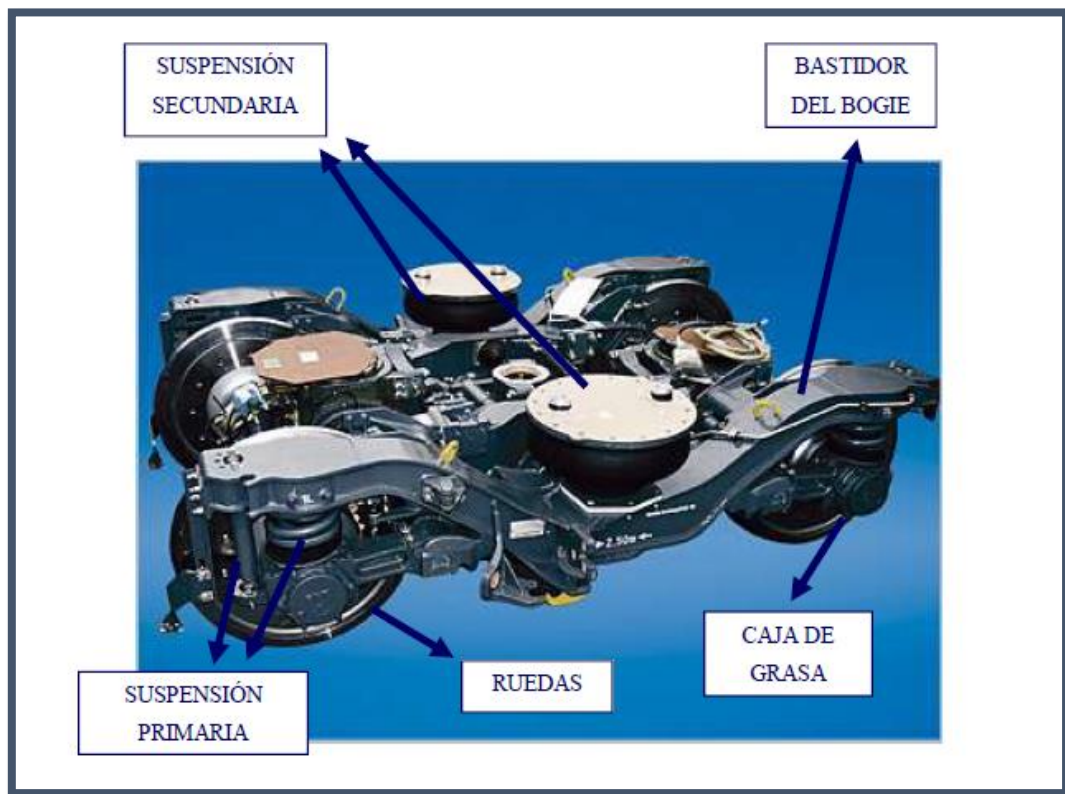


Figura 2.2: Partes del Bogie. [7]

El tren de la Serie 446 poseerá un bastidor de bogie en forma de “H”. Cada bogie estará compuesto por dos ejes de ruedas que se conectarán mediante el uso de rodamientos con las cajas de grasa (4 en cada bogie). Cada caja de grasa se une con el bastidor del bogie a través de una suspensión primaria formada por dos muelles helicoidales, un amortiguador KONI 02A- 1271 y dos guías binarias que aportaran rigidez longitudinal al sistema. La suspensión secundaria del bogie está constituida por dos balonas neumáticas PIRELLI o CONTINENTAL, dos amortiguadores verticales KONI 02V- 1085 y un amortiguador transversal KONI 04H- 1222.

En la Figura 2.3 se puede observar una imagen del bogie del tren de la Serie 446 cuando este se encuentra en funcionamiento.



Figura 2.3: Bogie de la Serie 446.

En la Figura 2.4 se pueden observar un esquema del bogie de la serie 446 con los elementos que conforman la suspensión señalados.

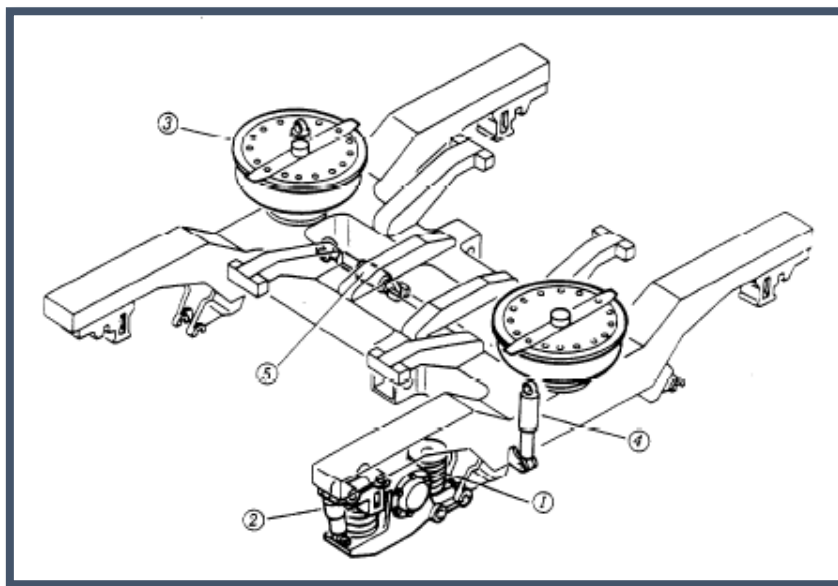


Figura 2.4: Esquema del Bogie de la Serie 446. [8]

Los elementos señalados son: 1-Resortes helicoidales. 2-Amortiguadores KONI 02A-1271. 3-Balonas neumáticas. 4-Amortiguadores verticales KONI 02V-1085. 5-Amortiguador transversal KONI 04H-1222.

2.3. EL MOVIMIENTO DE LAZO

El movimiento de lazo o Hunting Oscillation es un fenómeno que se da en los trenes cuando circulan en recta a una velocidad superior a la conocida como velocidad crítica. Consiste en desplazamientos laterales descontrolados que se dan propiciados por algún defecto en la vía debido a la conicidad de los perfiles de las ruedas y a la falta de paralelismo entre los dos carriles. Dependiendo de las condiciones iniciales de circulación se dará un movimiento de lazo de diferentes características. En la Figura 2.5 se puede ver una representación de dicho movimiento.

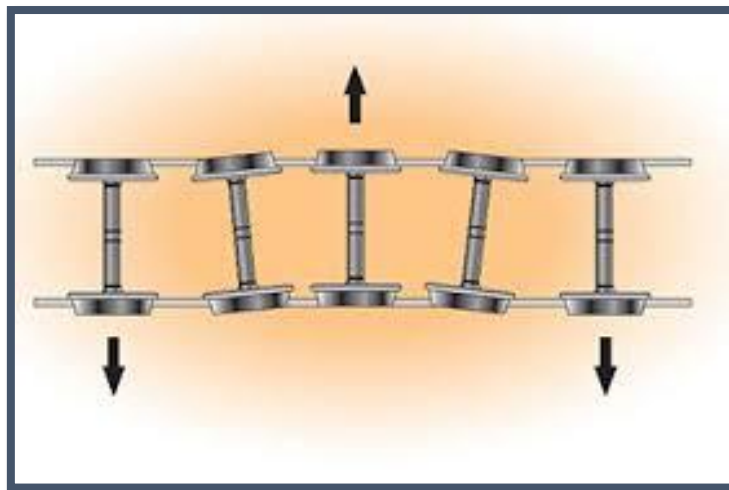


Figura 2.5: Representación del Movimiento de Lazo. [9]

El movimiento de lazo puede desarrollarse siguiendo un movimiento sinusoidal que permanece constante y estable a lo largo del tiempo, es lo que se conoce como ciclo límite, o de forma totalmente caótica e impredecible. Por tanto, de circular el tren a una velocidad superior a la velocidad crítica puede darse el descarrilamiento del mismo.

En este proyecto se va a calcular la velocidad crítica del tren y se va a analizar como varía el movimiento de lazo en función de la velocidad y de los parámetros que definen la suspensión.

2.4. CICLOS LÍMITE Y PLANOS DE FASE

Los ciclos límite son fenómenos no lineales que se corresponden con oscilaciones cuya amplitud y frecuencia, constantes a lo largo del tiempo, dependen directamente de las propiedades no lineales del sistema a estudiar [10].

En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de ciclo límite. En ella se puede apreciar como el desplazamiento, representado en el eje y de coordenadas, sigue una trayectoria cuya amplitud y frecuencia se mantienen constantes a lo largo del tiempo.

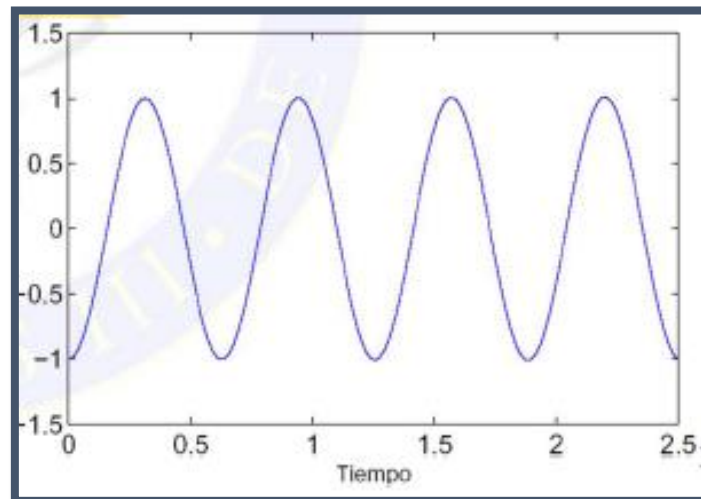


Figura 2.6: Ciclo Límite. [11]

Los ciclos límite representan fenómenos no lineales que pueden tener gran importancia y que pueden ser deseables, como por ejemplo si se quiere diseñar un oscilador, o indeseables, como la aparición de vibraciones en las alas de un avión.

Para estudiar los ciclos límite se utilizan los planos de fase. Estos son representaciones gráficas del fenómeno que relacionan el desplazamiento y la velocidad del movimiento a estudiar. Para ello se utiliza un eje de coordenadas en el que el eje x representa la posición y el eje y su derivada. En la Figura 2.7 se pueden ver dos ejemplos de ciclos límites con sus respectivos planos de fase.

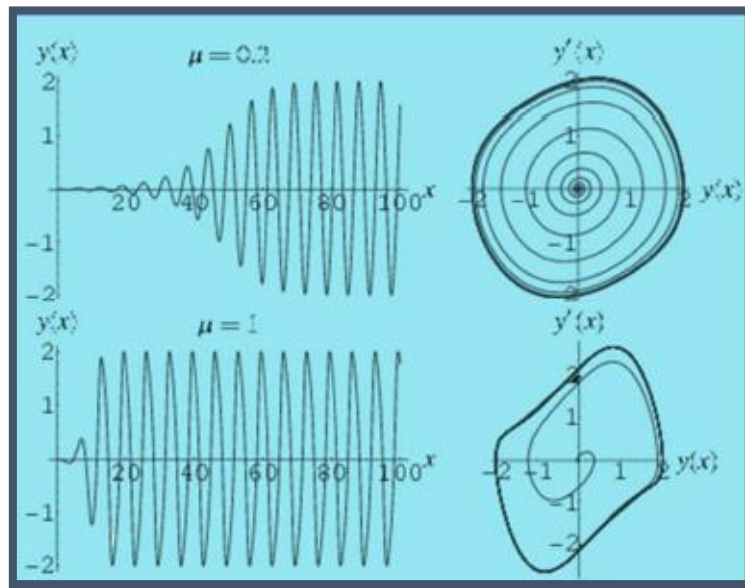


Figura 2.7: Ejemplos de Ciclos Límite.

En los planos de fase se comprueba la existencia de un ciclo límite si se puede apreciar una trayectoria cerrada. Si el resto de espirales o trayectorias representadas tienden a converger hacia la trayectoria cerrada el ciclo límite es estable. En cambio, si las espirales divergen de la trayectoria cerrada el ciclo límite es inestable. Se pueden dar también ciclos límite semi-estables cuando se produce una combinación de ambos. En la Figura 2.8 se pueden observar una representación del plano de fase de un ciclo límite estable (A) y del plano de fase de un ciclo límite inestable (B) [12].

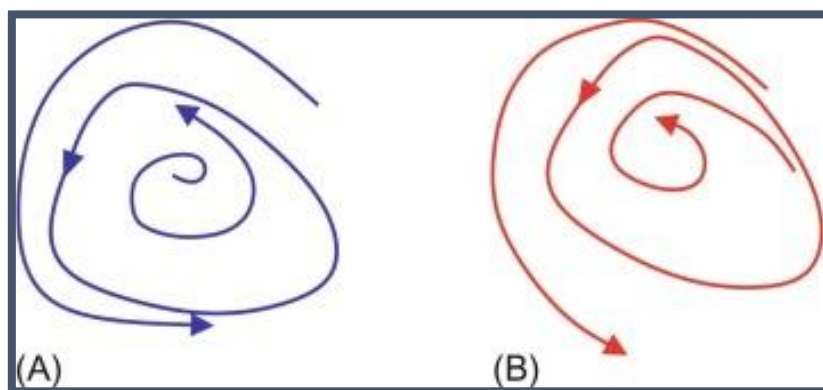


Figura 2.8: Ciclo Estable (A) y Ciclo Inestable (B). [10]

Para el análisis a realizar en el proyecto es clave introducir el concepto de bifurcación. Una bifurcación es el fenómeno que se produce cuando al variar cierto parámetro de las condiciones de contorno, la respuesta del sistema cambia de manera estructural (se produce un cambio muy significativo). Se va a estudiar si esto sucede en la simulación del tren al variar alguno de los parámetros que definen la suspensión.

Además, un sistema no lineal puede dar lugar a soluciones caóticas, es decir, comportamientos totalmente impredecibles que, por tanto, no tienen forma de ciclo límite. Su representación en el plano de fase no permitirá observar ninguna trayectoria cerrada y mostrará espirales desordenadas.

En la Figura 2.9 se puede ver la relación entre la posición y el tiempo de dos sistemas caóticos (azul y rojo).

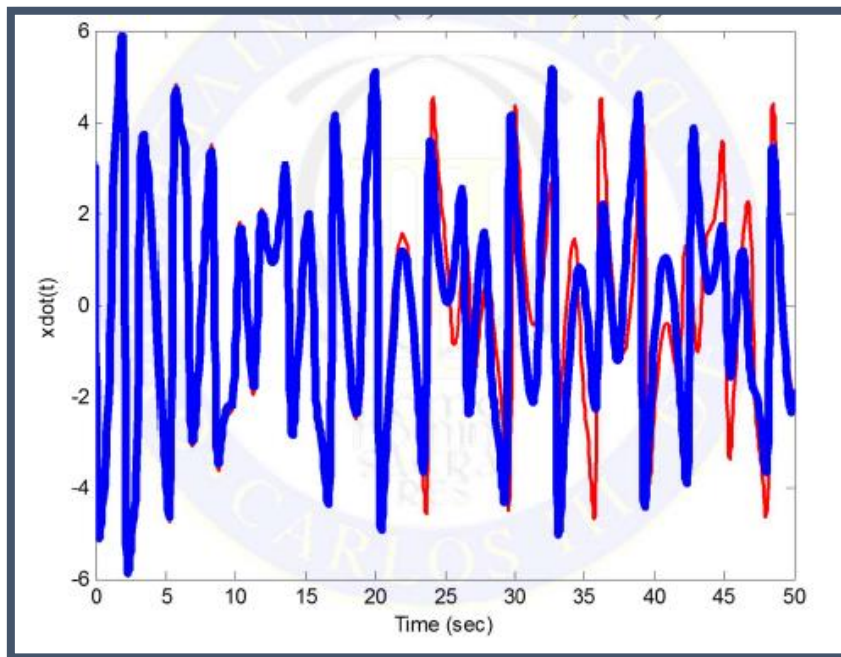


Figura 2.9: Sistemas no Lineales Caóticos. [11]

3. DESCRIPCIÓN DE **HERRAMIENTAS** **EMPLEADAS**

En este capítulo se va a realizar una presentación de las herramientas empleadas en el desarrollo del proyecto. Los programas utilizados son el software de CAD PTC Creo Parametric y el de simulación Universal Mechanism.

A través de PTC Creo Parametric se utilizan los diseños en CAD de los ejes de ruedas, las cajas de grasa y el bastidor del bogie del tren de la Serie 446, que fueron diseñados para la realización del TFG “Análisis de las Vibraciones de un Bogie Ferroviario ante excitación Genérica”, del mismo autor que el del presente proyecto. Con el programa, se realiza una simplificación de los elementos para facilitar su posterior procesado por Universal Mechanism. Además, se obtienen con este software los valores de las masas, la posición de los centros de gravedad y la matriz de los tensores de inercia de los diferentes elementos.

El programa Universal Mechanism se utiliza para implementar el montaje del tren y, posteriormente realizar las simulaciones de los casos de estudio. Para la realización del montaje, se va a realizar el ensamblaje de los ejes de rueda, las cajas de grasa, el bastidor del bogie y todos los elementos que conforman la suspensión primaria. Para simular la caja de los coches se impondrán diferentes fuerzas sobre los bogies en el lugar donde apoyan las balonas neumáticas, dependiendo de si el bogie pertenece al coche motor o al remolcado. Después se realizan las simulaciones a estudiar variando las velocidades, los pesos de los coches y la suspensión según corresponda.

A continuación se realiza la introducción de estos programas.

3.1. **PTC CREO PARAMETRIC**

PTC Inc. (Parametric Technology Corporation) es una empresa informática estadounidense fundada en Boston en 1985. La empresa se dedica al desarrollo de software informático. Entre sus creaciones destaca PTC Creo, paquete software destinado diseño de productos en 2D y 3D, a su análisis y a la posible revisión de los mismos.

Dentro del paquete PTC Creo se encuentra el programa de CAD PTC Creo parametric, utilizado en el presente proyecto. Creo Parametric, anteriormente conocido como Pro/Engineer, hace competencia a otros programas de diseño por ordenador como Catia, SolidEdge, NX, SolidWorks o Autodesk Inventor.

Entre las cualidades más importantes para optar por Creo Parametric para el desarrollo de diseños en CAD está su gran intuitividad de uso, su fácil aprendizaje y su gran capacidad para la realización de diseños de manera rápida y flexible. Debido a esta flexibilidad, gran cantidad de empresas han optado por su utilización, ya que permite la realización de modificaciones en los diseños para así conseguir productos mejorados ahorrando tiempos de trabajo.

Además, la compatibilidad con interfaces de CAM y CAE de PTC Creo supone un atractivo añadido de cara a las empresas, ya que esto supone un gran ahorro económico al no necesitar la compra de licencias de otros programas para la realización de dichas funciones.

En la Figura 3.1 se muestra un anuncio publicitario de PTC Creo Parametric.



Figura 3.1: Publicidad Creo Parametric. [13]

3.2. UNIVERSAL MECHANISM

Universal Mechanism es un paquete de software destinado a la simulación de sistemas mecánicos de cara a la realización de estudios cinemáticos y dinámicos de ámbito ingenieril. El paquete UM está compuesto por una serie de módulos que serán útiles para diferentes tipos de sistemas.

En la Tabla 2 se presentan todos los módulos que contiene el programa.

Tabla 2: Módulos de Universal Mechanism. [14]

<p><u>UM AUTOMOTIVE</u></p> 	<p>Módulo destinado a la simulación del comportamiento de vehículos de carretera. Permite la simulación de defectos en la carretera, circulación por diferentes trazados e incluye una biblioteca con diversos modelos de ruedas y tipos de suspensiones.</p>
<p><u>UM TRAIN</u></p> 	<p>El módulo permite calcular la dinámica longitudinal del tren en los modos de frenado, tracción y ralentí en diferentes configuraciones de vía de ferrocarril.</p>
<p><u>UM LOCO</u></p> 	<p>Módulo destinado al análisis del comportamiento dinámico del tren en recta y en curva. Posee una gran capacidad de cálculo e integración basándose en las ecuaciones de sólido rígido para la obtención de resultados.</p>

<p><u>UM TRACKED VEHICLE</u></p> 	<p>Módulo dedicado para la creación y el análisis dinámico de vehículos carenados.</p>
<p><u>UM FEM</u></p> 	<p>Este módulo se utiliza para la simulación de sistemas considerando que algún cuerpo se comporta como sólido deformable. Para ello utiliza los resultados de elementos finitos de programas como ANSYS y NASTRAN.</p>
<p><u>CAD INTERFACES</u></p> 	<p>Módulo utilizado para importar diseños en CAD de otros programas como Inventor o Creo para su posterior simulación.</p>
<p><u>UM EXPERIMENTS</u></p> 	<p>Este módulo sirve para llevar a cabo optimizaciones en función a los resultados obtenidos en análisis dinámicos previos.</p>
<p><u>UM CONTROL</u></p> 	<p>Este módulo funciona como interfaz entre el programa Universal Mechanism y Matlab/Simulink.</p>

<p style="text-align: center;"><u>UM BASE</u></p> 	<p>Es un módulo que funciona como la primera versión del programa Universal Mechanism, por medio de la realización de análisis lineales.</p>
<p style="text-align: center;"><u>UM SUBSYSTEMS</u></p> 	<p>Este módulo permite la creación de bases de datos con diferentes diseños para agilizar su posible utilización en el futuro. Cualquier subsistema creado por el usuario puede ser utilizado a posteriori.</p>
<p style="text-align: center;"><u>UM DURABILITY</u></p> 	<p>Este módulo se utiliza para la realización de análisis de la vida a fatiga a través de la utilización de softwares de cálculo de elementos finitos.</p>
<p style="text-align: center;"><u>UM GRANULAR MEDIA</u></p> 	<p>Módulo de cálculo del comportamiento plano de partículas a través de la realización de cálculos basados en las fuerzas de contacto que se producen entre ellas.</p>
<p style="text-align: center;"><u>UM 3D CONTACT</u></p> 	<p>Este módulo permite la realización de simulación de sistemas mecánicos calculando las interacciones que se producen entre cuerpos gráficos, habiendo dividido estos previamente en poliedros simples para su procesamiento.</p>

Para la realización del análisis en recta del tren de la Serie 446 se va a utilizar el módulo UM LOCO. Sobre este módulo es importante destacar que todos los cálculos realizados se basan en los principios del sólido rígido. El programa, para definir un elemento, necesita conocer la posición de su centro de gravedad, su masa y la matriz de tensores de inercia con respecto a su centro de gravedad. A su vez, será necesario definir también las condiciones de contorno, las fuerzas y las conexiones entre elementos en los puntos exactos en los que se producen para obtener resultados fidedignos con la realidad. Por otro lado, las imágenes de CAD introducidas en el modelado solo sirven como ayuda visual para la realización y comprensión del modelo y no afectarán a los resultados obtenidos.

4. METODOLOGÍA

En este apartado se van a describir la metodología que se ha seguido en la realización del proyecto.

- **METODOLOGÍA:** En la Figura 4.1 se muestra un esquema de los pasos seguidos a la hora de elaborar el proyecto. Estos serán explicados posteriormente.



Figura 4.1: Esquema de la Metodología del Proyecto.

ANTECEDENTES: Se destacan los siguientes trabajos que se han utilizado como base para la elaboración de este proyecto:

- El Artículo “*Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon*” de H. Molatefi, M. Hecht y M. H. Kadivar [3].
- El Artículo “*Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions*” de M.A. Rezvani y A. Mazraeh [15].

PLANNING: En la realización del estudio se han seguido los siguientes pasos:

- 1- Obtención de los diseños en CAD y de datos de relevancia.
 - 2- Montaje e implementación del modelo en UM.
 - 3- Preparación de las simulaciones.
 - 4- Realización de las simulaciones.
- **RESULTADOS ESPERADOS:** Con este proyecto se esperan obtener los resultados de la velocidad crítica a la que puede desestabilizarse el tren de la Serie 446 cuando circula en vacío, a media carga y con una ocupación máxima. Se espera conocer como afectarían sobre estos resultados la imposición de cambios en la suspensión. Además, para la realización de un análisis más exhaustivo, se obtendrán los valores de la posición, velocidad y aceleración laterales de los ejes y los bastidores de los bogies; los posibles ciclos límite y los planos de fase cuando el tren circula a diferentes velocidades en cada caso de estudio. También se hallaran las gráficas que relacionan la máxima amplitud de desplazamiento lateral con la velocidad de circulación del tren.

4.1. OBTENCIÓN DE LOS DISEÑOS EN CAD Y DE DATOS DE RELEVANCIA.

Para la realización de la simulación del comportamiento en recta del tren de la Serie 446 en Universal Mechanism se ha decidido realizar el montaje del bogie del tren en el programa y, posteriormente, ejercer sobre el los pesos correspondientes a las cajas de los coches para lograr el mismo resultado que simulando el tren al completo. Debido a que las taras de los coches motores y remolques son distintas, será necesaria la elaboración de una simulación distinta para cada caso.

El módulo UM LOCO de Universal Mechanism trabaja basándose en los principios del sólido rígido. Por ello, para poder realizar los cálculos el programa necesitará conocer la posición exacta de cada elemento cuando el sistema se encuentra en equilibrio, su centro de gravedad, su masa y su matriz de momentos de inercia. Además será necesario definir las condiciones de contorno, las uniones y los elementos de conexión como resortes o amortiguadores que se den entre elementos. Sin embargo el empleo de los diseños en CAD solo afectará al estudio de manera visual, es decir, en el programa se definen los valores explicados anteriormente y, luego, se añade una imagen para representar al elemento en cuestión.

Para la obtención de estos valores y de las imágenes de los diferentes elementos, se han utilizado los diseños en CAD elaborados a través del programa PTC Creo Parametric en el TFG “Análisis de las Vibraciones de un Bogie ferroviario ante Excitación Genérica” del mismo autor que el presente proyecto. Para la posterior simulación se necesitan obtener los datos de los ejes de ruedas, las cajas de grasa y el bastidor del bogie. En cuanto a las imágenes CAD solo serán necesarias las de las cajas de grasa y en bastidor del bogie, ya que Universal Mechanism ya incluye paquetes con diferentes perfiles de ruedas.

Además, para que el peso gráfico sea asumible por Universal Mechanism, se han realizado simplificaciones geométricas del CAD del bastidor del bogie y de las cajas de grasa a posteriori de la obtención de los datos clave.

Los diseños están elaborados a partir de los planos recogidos en la Norma Técnica de Mantenimiento del bogie del tren de la Serie 446 [8], donados por RENFE a la Universidad Carlos III de Madrid bajo acuerdo de confidencialidad.

Los diseños de PTC Creo Parametric utilizados son los siguientes:

- **EJE MONTADO:**

Este diseño se ha utilizado solamente para la obtención del centro de gravedad, la masa y la matriz de momentos de inercia de los ejes de ruedas. No será necesaria la utilización de la imagen en CAD, ya que Universal Mechanism dispone de paquetes con diferentes perfiles de ruedas para su utilización.

En las Figuras 4.2 y 4.3 se pueden ver la vista isométrica y la planta del diseño en CAD del eje de ruedas del tren de la Serie 446 en PTC Creo Parametric.

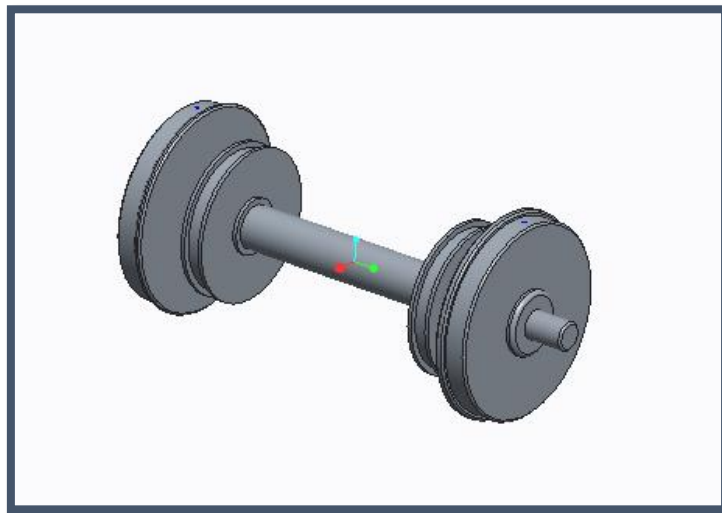


Figura 4.2: Vista Isométrica del Eje en Creo.

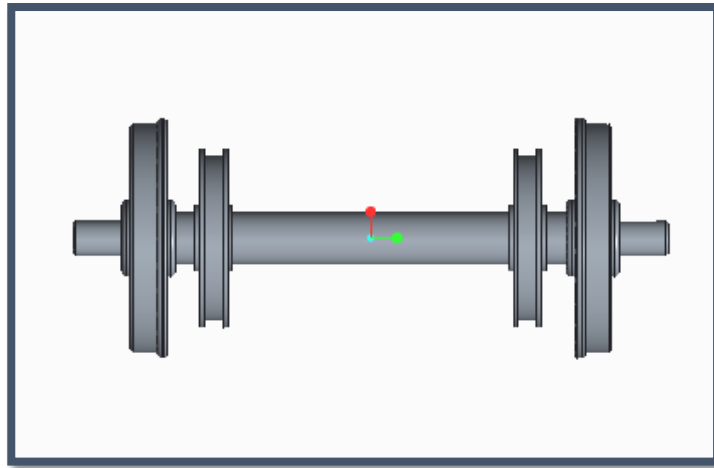


Figura 4.3: Vista de Planta del Eje en Creo.

Se introduce el acero como material del eje a través de la biblioteca de materiales del programa. Posteriormente se utiliza el comando “Propiedades de masa” de la pestaña “Análisis” para obtener los valores de la masa y la matriz de momentos de inercia del eje. Estos valores son:

- Masa del eje = 2443.95 (kg)
- Matriz de Momentos de Inercia = $\begin{pmatrix} 1518.43 & 0 & 0 \\ 0 & 178.64 & 0 \\ 0 & 0 & 1518.43 \end{pmatrix} (kg * m^2)$

*Siendo la componente I_{yy} de la matriz de momentos de inercia en sentido transversal (a lo largo del eje).

- **CAJAS DE GRASA:**

El diseño en CAD de las cajas de grasa a través del programa PTC Creo Parametric se va a utilizar tanto para conocer los valores de la posición del centro de gravedad, la matriz de momentos de inercia y la masa de las mismas; como para usarlo como imagen para representar las cajas de grasa en Universal Mechanism.

Cada bogie presenta cuatro cajas de grasa simétricas dos a dos, por tanto será necesaria la utilización de dos diseños simétricos entre sí.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se pueden ver los diseños en PTC Creo Parametric de las cajas de grasa 1 y 2.

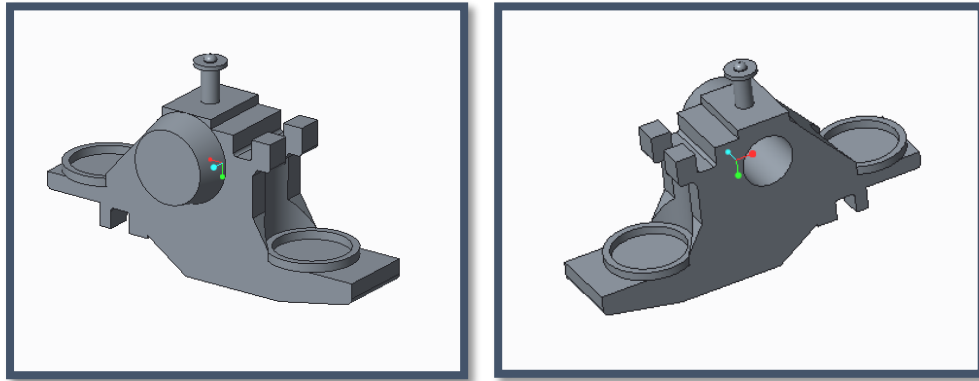


Figura 4.4: Caja de Grasa 1.

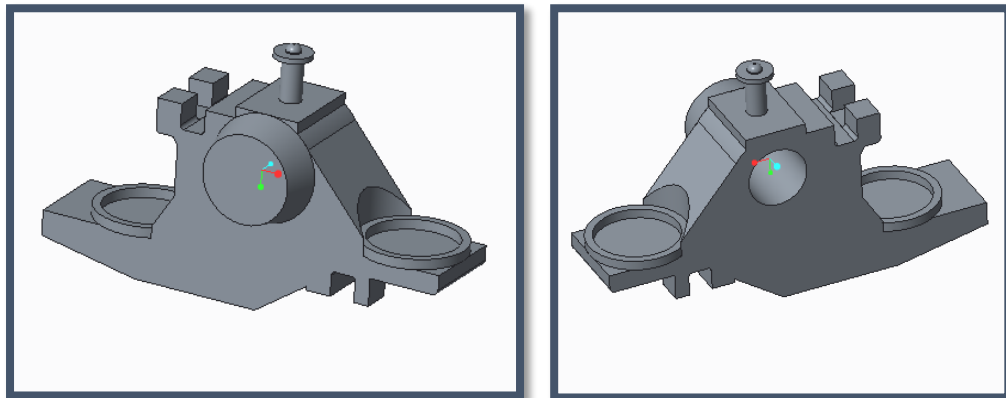


Figura 4.5: Caja de Grasa 2.

Se introduce acero como material para las cajas y, posteriormente, se han los valores requeridos a través del comando “Propiedades de masa” de la pestaña “Análisis” de Creo Parametric. Estos valores son:

- Masa de la caja de grasa = 243.86 (kg)
- Matriz de Momentos Inercia = $\begin{pmatrix} 3.97 & 1.16 & -8.74 \\ 1.16 & 7.91 & 2.51 \\ -8.74 & 2.51 & 9.90 \end{pmatrix} (kg * m^2)$

*Siendo la dirección “y” la vertical de la caja de grasa y la “z” la dirección del rodamiento (eje del agujero central).

- **BASTIDOR DEL BOGIE:**

Para la simulación del tren de la Serie 446 en Universal Mechanism es necesario obtener la imagen en CAD del bastidor del Bogie y los valores de la masa, la posición del centro de gravedad y la matriz de momentos de inercia del mismo. Para reducir el peso gráfico de la imagen se ha realizado una simplificación del bastidor a través de Creo. Esta simplificación consiste en hacer el bastidor macizo en vez de hueco (originariamente está construido a través de soldadura de chapas). Los valores que se quieren averiguar son calculados antes de hacer la simplificación.

En la Figura 4.6 se puede observar la imagen del diseño en CAD del bastidor del bogie simplificado diseñado en PTC Creo Parametric.

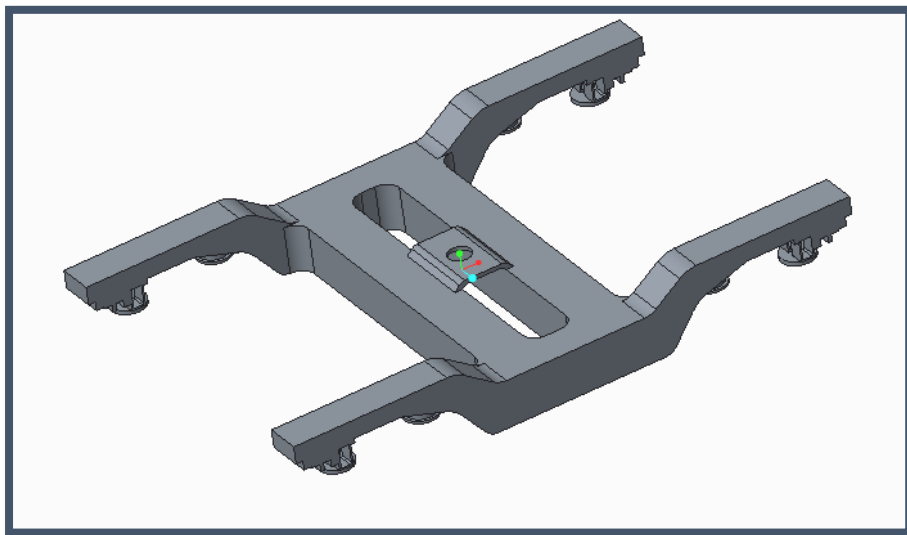


Figura 4.6: Bastidor del Bogie en CAD.

Antes de realizar la simplificación del bastidor se indica que el material del mismo sea acero y, posteriormente, se calculan los siguientes valores del mismo:

- Masa del bastidor del bogie = 1576.53 (kg)
- Matriz de Momentos Inercia = $\begin{pmatrix} 1392.08 & -0.009 & -0.014 \\ -0.009 & 1308.74 & 0 \\ -0.014 & 0 & 2631.4 \end{pmatrix} (kg * m^2)$

*Siendo el eje “x” en la dirección longitudinal de la marcha, el eje “y” en la dirección transversal y el eje “z” en la vertical.

4.2. MONTAJE E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN UM.

Para la realización de la simulación del comportamiento en recta del tren de la Serie 446 en Universal Mechanism, será necesario realizar el montaje y la implementación del mismo previamente en el programa.

Para la realización del montaje se van a seguir los siguientes pasos:

1. CREACIÓN DEL PROYECTO:

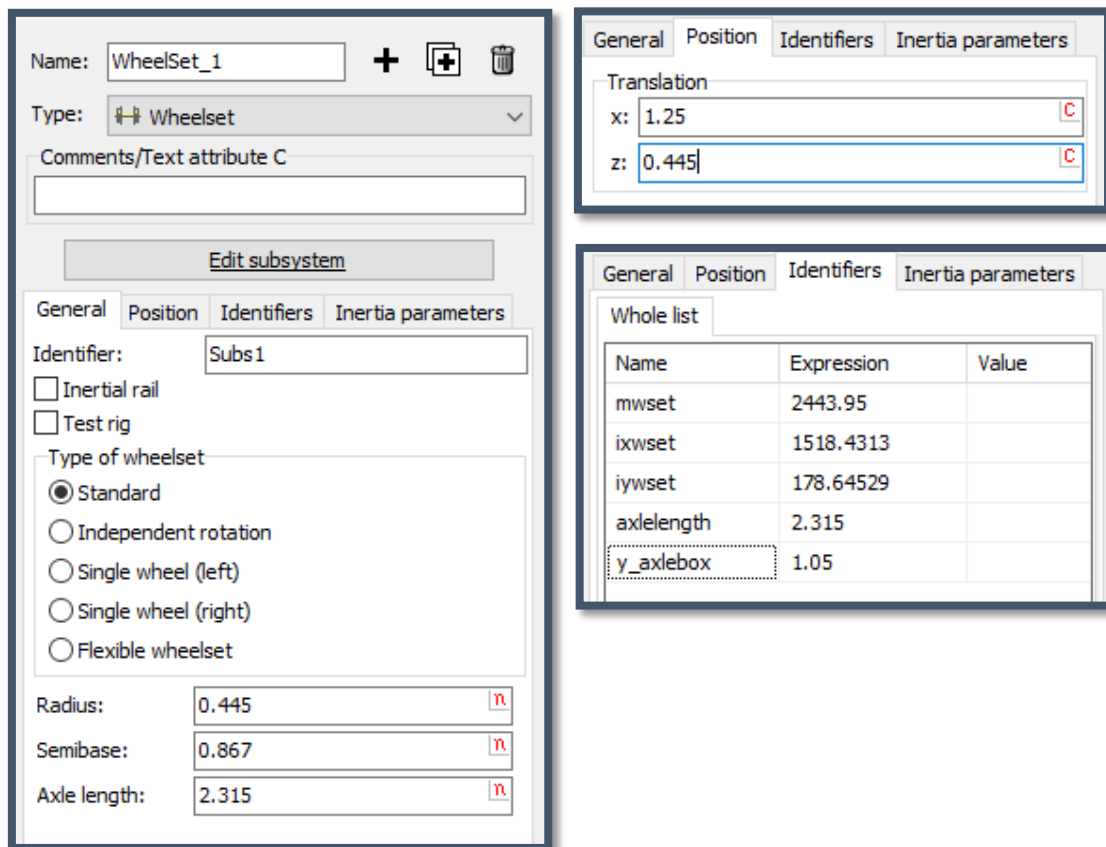
Para ello será necesario abrir el programa **UM Input** y crear un proyecto utilizando el comando **File / New Object**. Luego se guarda el archivo con el nombre que se quiera dar, en este caso “CAF_446”.

2. CREACIÓN DE LOS EJES DE RUEDAS:

El programa Universal Mechanism posee una base de ejes de ruedas cuya utilización es de gran utilidad, ya que supone un ahorro importante en cuanto a los tiempos de diseño.

Para la realización del montaje del bogie de la Serie 446 será necesaria la creación de dos ejes de ruedas separados 2,5 metros entre sí (empate del bogie). Los ejes de ruedas en UM se introducen como subsistemas. Se selecciona con el botón derecho el comando **Subsystems** y se añade un nuevo grupo de subsistemas del tipo **Wheelset**. Es necesario introducir los parámetros que definen el eje. Estos son el radio de las ruedas, la longitud del eje, la semibase (distancia entre las huellas de contacto de las ruedas de un mismo eje) y la posición del mismo en el espacio. Estos valores se obtienen de la Norma Técnica de Mantenimiento del bogie de la Serie 446 [8]. Además es necesario indicar los valores de la masa y los momentos de inercia del eje, obtenidos anteriormente a través de PTC Creo Parametric.

En la Figura 4.7 se pueden observar los parámetros introducidos en Universal Mechanism para definir el primer eje de ruedas. La posición en “x” del eje es 1,25 metros, ya que este es el valor de la mitad del empate del bogie (distancia entre ejes); mientras que la posición en “y” es 0,445 metros, valor del radio de la rueda, para que esta apoye en el carril a una altura de 0 metros.



The screenshot displays the 'WheelSet_1' configuration window in Universal Mechanism. The 'Position' tab is selected, showing the translation parameters: x: 1.25 and z: 0.445. The 'General' tab shows the identifier 'Subs1' and the type of wheelset set to 'Standard'. The 'Inertia parameters' tab is also visible. A table titled 'Whole list' is shown in the bottom right, listing parameters and their values.

Name	Expression	Value
mwset	2443.95	
ixwset	1518.4313	
iywset	178.64529	
axlelength	2.315	
y_axlebox	1.05	

Figura 4.7: Parámetros Eje de Ruedas en UM.

Posteriormente se procede a la creación del segundo eje. Se repite la secuencia anteriormente explicada con la excepción de cambiar la posición en “x” del eje por -1,25 metros, valor de la mitad del empate del bogie.

En la Figura 4.8 se pueden ver los ejes de ruedas ya creados en Universal Mechanism.

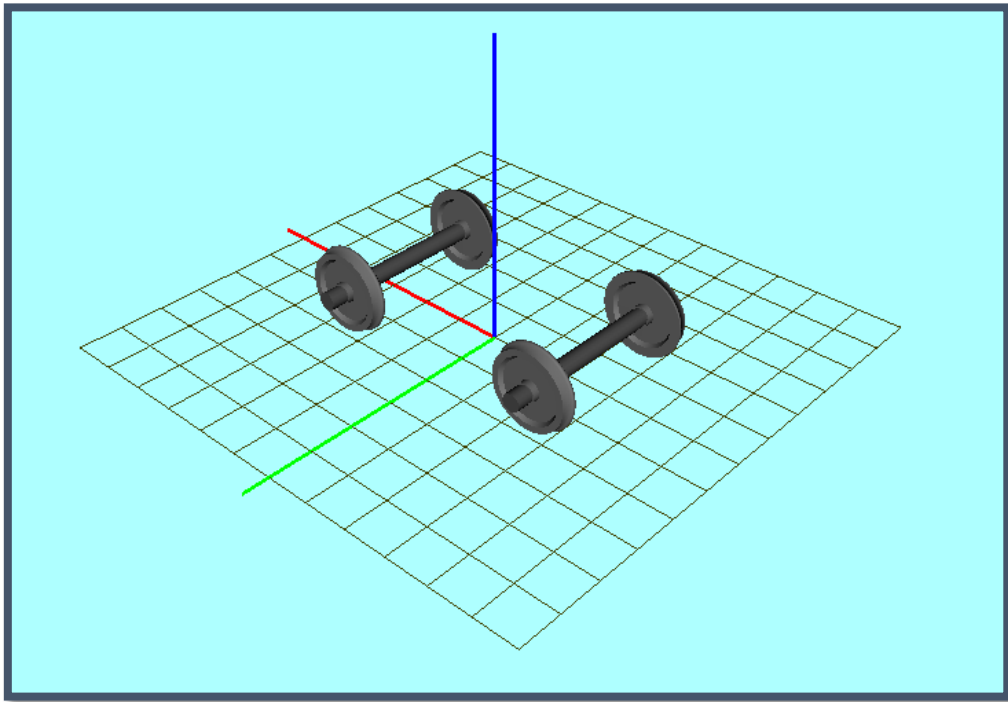


Figura 4.8: Ejes de Ruedas en UM.

3. MONTAJE DE LAS CAJAS DE GRASA:

Para la implementación de las cajas de grasa en el modelo se van a utilizar los diseños en CAD realizados a través de PTC Creo Parametric. Para que UM pueda utilizar el archivo, es necesario exportarlo desde Creo a UM utilizando la extensión de Creo **UM Converter**. De esta forma se creará un archivo .UCF que sí será compatible.

Una vez creados los archivos .UCF se utiliza el comando de UM **Read from file** para poder cargar las imágenes de las cajas de grasa. Las imágenes se cargan con la misma posición de referencia que presentaban en Creo.

Para la creación de elementos en Universal Mechanism es necesaria la creación de un cuerpo; con su centro de gravedad, masa y matriz de momentos de inercia definidos. Posteriormente, se ligará dicho cuerpo a su imagen correspondiente. Es importante que el cuerpo creado y la imagen coincidan en cuanto a posición y orientación para no dar lugar a error.

Se van a crear un total de cuatro cajas de grasa, que serán identificadas con los siguientes nombres:

- **Caja_ID** (Caja de grasa Izquierda Delantera).
- **Caja_DD** (Caja de grasa Derecha Delantera).
- **Caja_IT** (Caja de grasa Izquierda Trasera).
- **Caja_DT** (Caja de grasa Derecha Trasera).

La Caja_ID y la Caja_DT utilizarán la imagen de la caja de grasa 1 diseñada en Creo, mientras que las otras dos usarán la de la caja de grasa 2. Esto es debido a que las cajas de grasa son simétricas dos a dos entre sí.

Una vez cargadas todas las imágenes en el proyecto se dispone a la creación de los cuerpos de las cajas de grasa. Para ello se hace clic derecho en el comando **Bodies** y se selecciona **Add element to group “Bodies”**. Luego será necesario rellenar todos los parámetros que definen la caja de grasa.

En la Figura 4.9 se muestra la caja de grasa izquierda delantera introducida en UM y en la Figura 4.10 los parámetros introducidos para definirla.

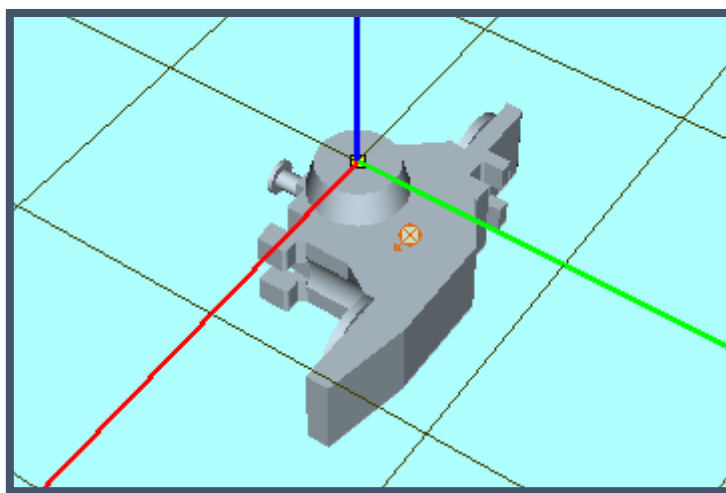


Figura 4.9: Caja_ID en UM.

Name: CAJA_ID

Comments/Text attribute C

Oriented points Vectors 3D Contact

Parameters Position Points

Coordinates (PP): Quaternion

Go to element

Image: ☒ Visible

CAJA_ID

☐ Compute automatically

Inertia parameters

Mass: m_cajagrasa

Inertia tensor:

3.9934629e+ ^C	1.1549242e+ ^C	-8.8726102e- ^C
	7.9454433e+ ^C	-2.5178185e- ^C
		9.9468735e+ ^C

Added mass matrix: (none)

Coordinates of center of mass

4.2863084e- ^C	1.2158808e- ^C	-1.6312673e- ^C
--------------------------	--------------------------	---------------------------

Figura 4.10: Parámetros Caja_ID.

Se introducen los valores hallados a través de PTC Creo Parametric. Para la creación de las otras tres cajas de grasa se utiliza el mismo procedimiento explicado anteriormente.

Una vez creados los cuerpos de las cuatro cajas de grasa con sus respectivas imágenes es hora de colocarlas en el modelo. Las cajas de grasa van unidas a los ejes de las ruedas por medio de rodamientos, por ello se van a ligar en el modelo con los ejes a través de uniones rotacionales para simular el comportamiento real. Para realizar las uniones se utiliza el comando **Joints** y se selecciona que la unión sea del tipo **Rotational**. Se indican los elementos a unir, los puntos de estos elementos entre los cuales esta se produce y la orientación en la que se permite la orientación entre elementos. En primer lugar se efectúa la unión de la caja izquierda delantera y el eje de ruedas delantero.

En la Figura 4.11 se puede ver la representación gráfica de esta unión y en la Figura 4.12 los parámetros introducidos para definirla.

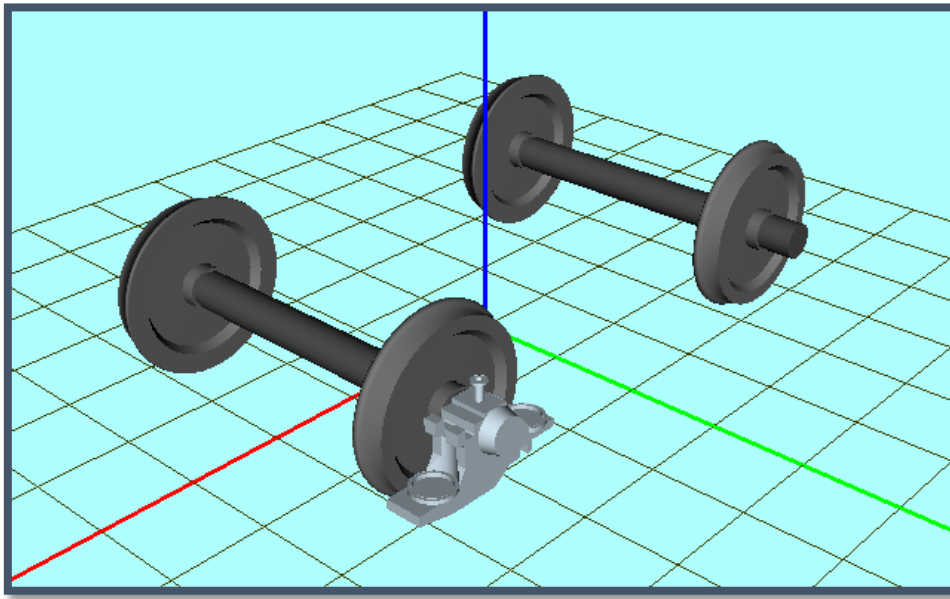


Figura 4.11: Unión del eje delantero y la caja izquierda delantera.

Name: CAJA_ID			+	+	🗑️	▼
Body1:		Body2:				
WheelSet_1.WSet		CAJA_ID				
Type: Rotational						
Geometry Description Joint force						
Joint points						
WSet						
	C	1.264185	C		C	
CAJA_ID						
	C		C		C	
Joint vectors						
WSet		axis Y : (0,1,0)				
0	n	1	n	0	n	
CAJA_ID		axis Z : (0,0,1)				
0	n	0	n	1	n	

Figura 4.12: Parámetros de la unión entre el eje delantero y la Caja_ID.

Se sigue el mismo procedimiento para la colocación de las otras tres cajas de grasa. En la Figura 4.13 se muestra el resultado del montaje de los ejes de ruedas y las cajas de grasa.

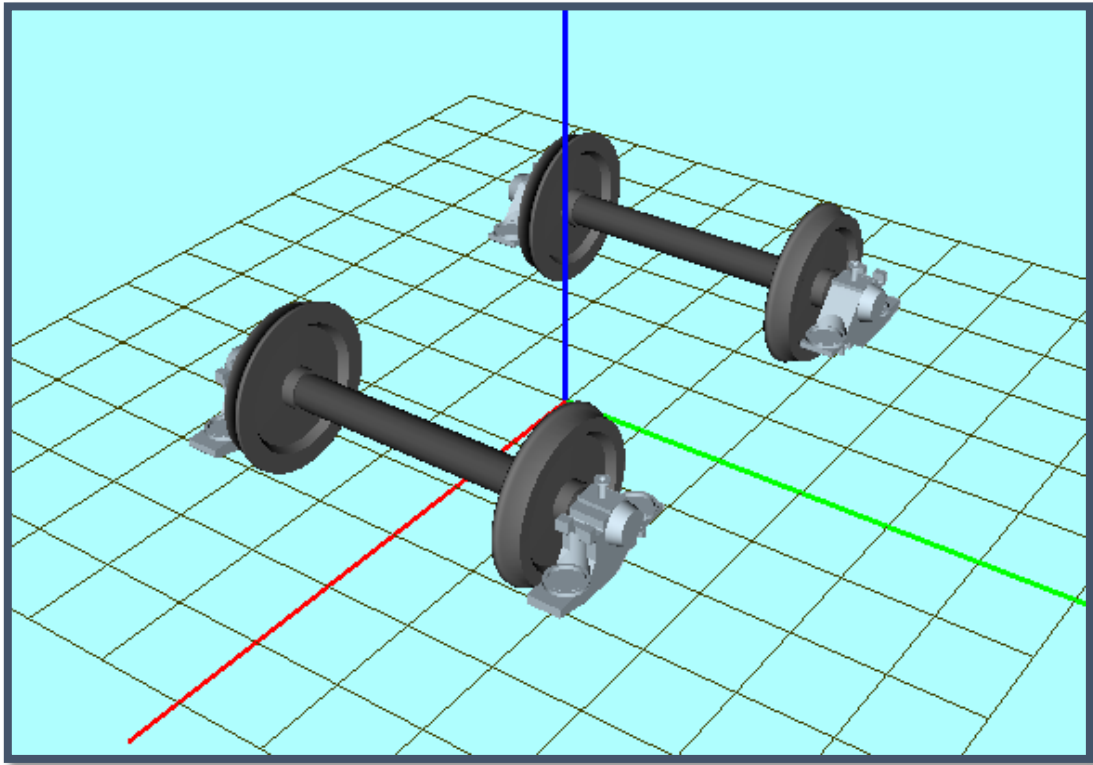


Figura 4.13: Montaje ejes y cajas de grasa en UM.

4. COLOCACIÓN DEL BASTIDOR DEL BOGIE:

Una vez colocados los ejes de ruedas y las cajas de grasa, se dispone a la inserción del bastidor del bogie en el modelo. Los pasos a seguir serán similares a los anteriormente explicados.

En primer lugar se carga la imagen del diseño en CAD del bastidor realizada en Creo. Para exportar el archivo se utiliza la extensión **UM Converter** de Creo Parametric y, a continuación, se carga la imagen en el proyecto.

Más tarde, será necesario crear el cuerpo del bastidor en Universal Mechanism. Para conseguirlo se añade al modelo un cuerpo a través de la utilización del comando **Bodies**. Luego se introducen los parámetros del centro de gravedad, la masa y la matriz de momentos de inercia y, además, se asocia el cuerpo con la imagen importada del bastidor.

En la Figura 4.14 se muestran los parámetros introducidos para definir el cuerpo del bastidor. Destacar que estos valores se han obtenido a través del modelo en PTC Creo Parametric.

The screenshot shows the 'Bodies' dialog box in Universal Mechanism. The 'Name' field is set to 'BASTIDOR'. Below it is a 'Comments/Text attribute C' field. The 'Oriented points' tab is selected, showing 'Parameters' for 'Coordinates (PP):' set to 'Quaternion'. There is a 'Go to element' button and a 'Visible' checkbox which is checked. The 'Image' dropdown is set to 'BASTIDOR'. The 'Compute automatically' checkbox is unchecked. Under 'Inertia parameters', the 'Mass' is '1.5765357e+03'. The 'Inertia tensor' is a 3x3 matrix with values: 1.3920886e+, 9.0252875e-, 1.4598585e-0, 1.3087434e+, and 2.6313993e+. The 'Added mass matrix' is '(none)'. The 'Coordinates of center of mass' are: , , 2.4303589e-0.

Figura 4.14: Parámetros Bastidor del Bogie en UM.

Una vez creado el cuerpo será el momento de montarlo en el modelo. Para colocar el bastidor será necesaria la realización de una unión de seis grados de libertad. Se utiliza el comando **Joints** para crearla y se indica la posición exacta del elemento.

En la Figura 4.15 se puede observar el modelo con el bastidor del bogie ya colocado.

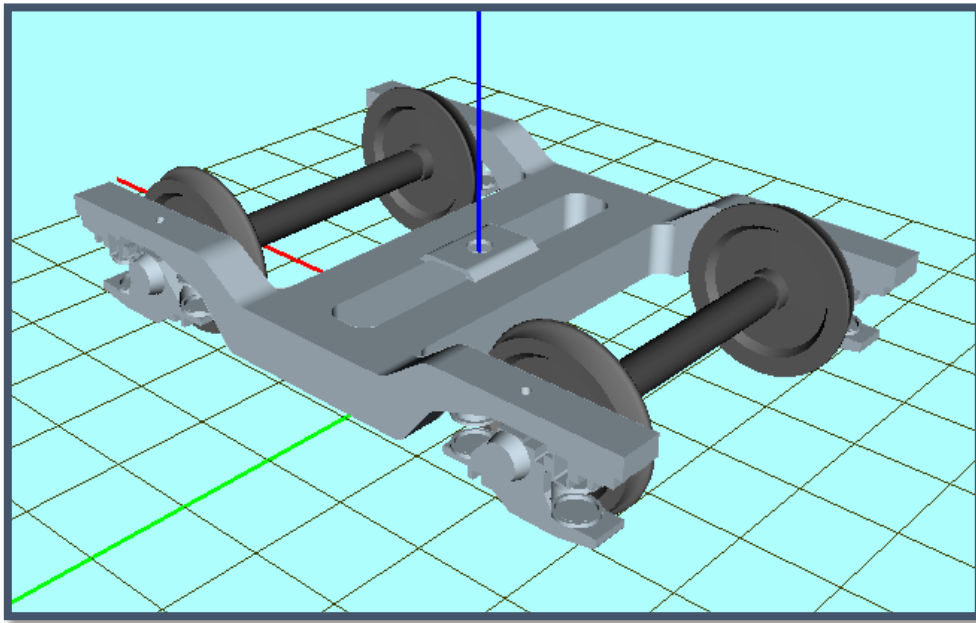


Figura 4.15: Conjunto Ejes - Cajas de grasa - Bastidor en UM.

5. IMPLEMENTACIÓN DE LA SUSPENSIÓN PRIMARIA:

La suspensión primaria es aquella que se encarga de unir la masa no suspendida del tren con la masa suspendida. En el caso del tren de la Serie 446, esta está ubicada entre las cajas de grasa, que a su vez van unidas por medio de rodamientos con los ejes de las ruedas, y el bastidor del bogie.

La suspensión primaria del modelo va a estar formada por una serie de elementos:

- Ocho resortes helicoidales **(1)**. Cada caja de grasa queda unida con el bastidor por medio de dos muelles.
- Cuatro amortiguadores KONI 02A- 1271 **(2)**. Cada uno de ellos va colocado entre el bastidor del bogie y una caja de grasa.
- Ocho guías binarias o barras de torsión **(3)**. Cada caja de grasa se une a través de dos guías con el bastidor.

En la Figura 4.16 se puede ver un plano de la suspensión primaria del tren de la Serie 446 con sus elementos indicados.

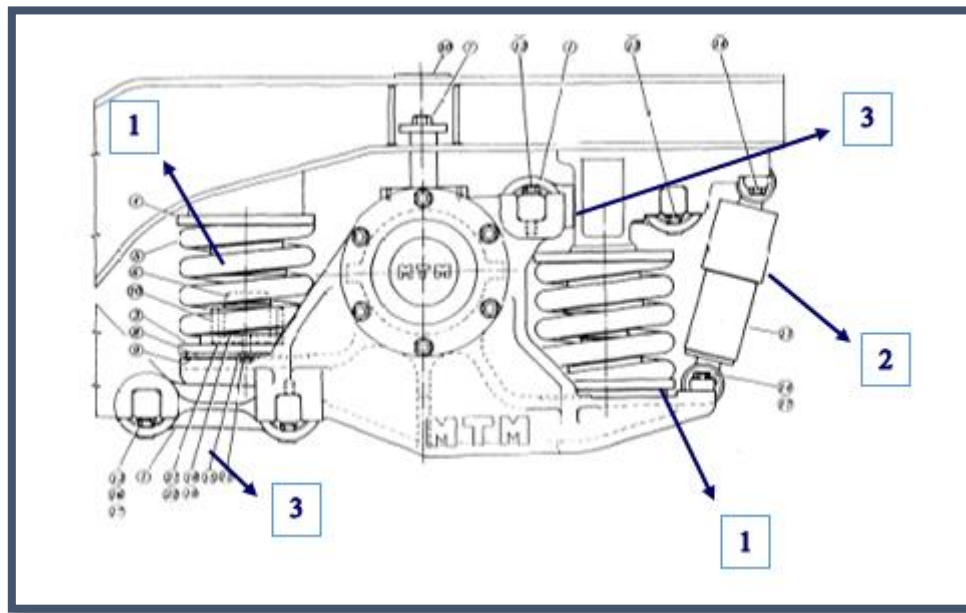


Figura 4.16: Suspensión Primaria Serie 446. [8]

En primer lugar se implementan en el modelo los resortes helicoidales. Para crear un resorte es necesaria la introducción de una fuerza entre elementos a través de la utilización del comando **Special forces**. Se selecciona que esta sea del tipo **Spring**, es decir, de tipo muelle. A continuación será necesaria la introducción de los valores de las variables que definen el muelle. Estas variables serán los elementos a unir, los puntos de los elementos a los que va conectado y la dirección del muelle, la longitud libre del muelle y las rigideces vertical y lateral del resorte. Los valores de la longitud de los muelles y de sus rigideces se han obtenido de la Norma Técnica de Mantenimiento del bogie de la Serie 446 [8]. Los valores de rigidez lateral introducidos no solo son efectuados por los muelles en la realidad, pero como simplificación se ha decidido realizar este aporte de rigidez de la suspensión primaria a través de ellos. El valor de la rigidez vertical de cada muelle ha sido hallado a partir del valor de la flexibilidad del bogie.

Estos parámetros son los siguientes:

- Longitud del resorte = 0,175 (m).
- Rigidez Vertical del resorte = 437500 (N/m).
- Rigidez Lateral del resorte = 1610000 (N/m).

Universal Mechanism permite la introducción de imágenes de muelles para realizar su representación gráfica. Será necesaria la indicación del número de espiras y los diámetros interior y exterior de los resortes representados.

Se crearán uno a uno los ocho muelles del modelo, introduciendo los valores de los parámetros anteriormente indicados. La Figura 4.17 muestra los parámetros introducidos para la colocación del muelle helicoidal interior que une la caja izquierda trasera con el bastidor del bogie, y en la Figura 4.18 se puede ver la representación gráfica de su colocación.

Name: Spring_INT_IT

Comments/Text attribute C

Body1: CAJA_IT Body2: BASTIDOR

Type: Spring

GO: Muelle

Attachment points

CAJA_IT: 0.2872 0.1276 0.1715

BASTIDOR: -0.9628 1.0925 0.2594

Attachment Parameters

Direction

☐ X ☐ Y ☐ Z

☐ -X ☒ -Y ☐ -Z

Attached SC BASTIDOR

0.00000000 0.00000000 0.00000000

Length: 0.175

Compute for the second body

☒ Autocomputing for 2nd body

Attachment Parameters

Stationary force

0 0 0

Type of spring

☐ Equivalent beam

☒ Experiment

Axial stiffness (CI): K_Vertical_Muelle ...

Lateral stiffness (Cs): K_Lateral_Muelle ...

Bending stiffness (Cphi): ...

Torsion stiffness (Ca): ...

Figura 4.17: Parámetros Resortes Helicoidales UM.

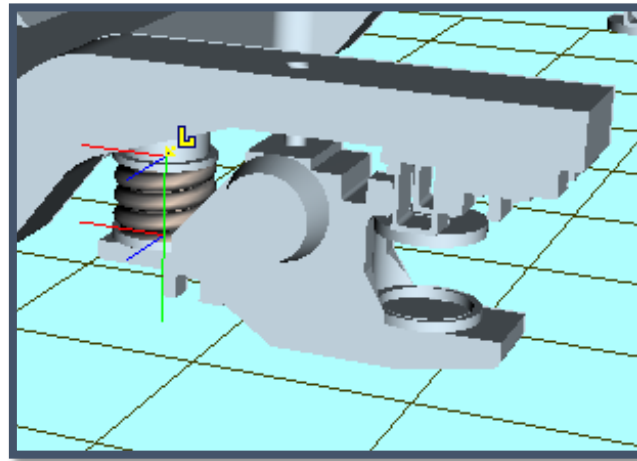


Figura 4.18: Muelle Interior de la Caja_IT.

A continuación se introducen el resto de muelles, pudiéndose ver el resultado del montaje en la Figura 4.19.

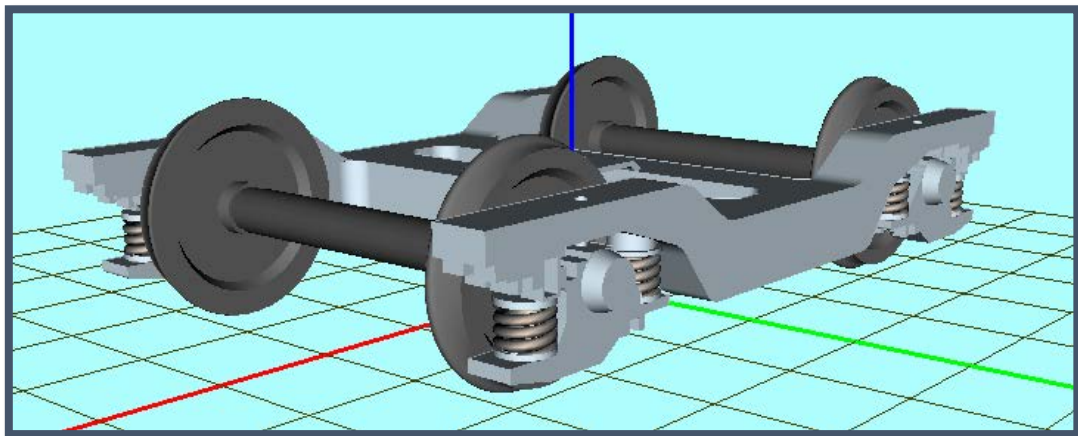


Figura 4.19: Colocación de Resortes en el Modelo en UM.

Se continúa la implementación de la suspensión primaria por medio del acoplamiento de los cuatro amortiguadores del modelo KONI 02A- 1271. Cada uno de ellos va situado entre el bastidor del bogie y cada caja de grasa. Para su representación gráfica se utilizará la imagen de un amortiguador que contendrá la biblioteca de imágenes del programa UM.

Para conocer el coeficiente de amortiguamiento de este amortiguador se sigue la siguiente Ecuación (1):

$$F = c \times v \quad (1)$$

Donde “F” es la fuerza que proporciona el amortiguador, “c” es la constante de amortiguación y “v” la velocidad en la que trabaja el amortiguador. Se conoce que para una velocidad de 0,3 (m/s) el amortiguador proporciona una fuerza de oposición al movimiento de 10.000 (N) [16]. Introduciendo estos valores en la ecuación (1) se obtiene que el coeficiente de amortiguación “c” toma un valor de 33.333,33 (N·s/m).

La longitud, diámetro y posición de los amortiguadores se saca a partir de los planos del bogie de la Serie 446 [8].

Para la implementación de los amortiguadores se utiliza en Universal Mechanism el comando **Bipolar Force** y seleccionando que la fuerza a introducir sea del tipo **Linear** (lineal). Este comando crea una fuerza que afecta de manera bipolar a dos elementos. Después se selecciona la imagen del amortiguador, previamente cargada, y se indican los valores de los parámetros que definen el amortiguador. Se comienza con el amortiguador que une la Caja_IT con el bastidor y se continúa con los otros tres elementos.

En la Figura 4.20 se pueden ver los parámetros introducidos en el programa para definir el amortiguador izquierdo trasero y en la Figura 4.21 la imagen de cómo quedaría colocado.

Name: Amortiguador_IT

Comments/Text attribute C

Body1: CAJA_ITBody2: BASTIDOR

GO: Amortiguador

☐ Autodetection

Attachment points

CAJA_IT:

-0.43330.20480.1716

BASTIDOR:

-1.8331.092780.37454

Length 0.396672

Linear

$$F = F_0 - c^*(x - x_0) - d * v + Q * \sin(w * t + a)$$

Force (F0): 0

Stiffness coef. (c): 0

Coordinate (x0): 0.396672

Damping coef. (d): C_Amortiguador

Amplitude (Q): 0

Frequency (w): 0

Initial phase (a): 0

Figura 4.20: Parámetros Amortiguador en UM.

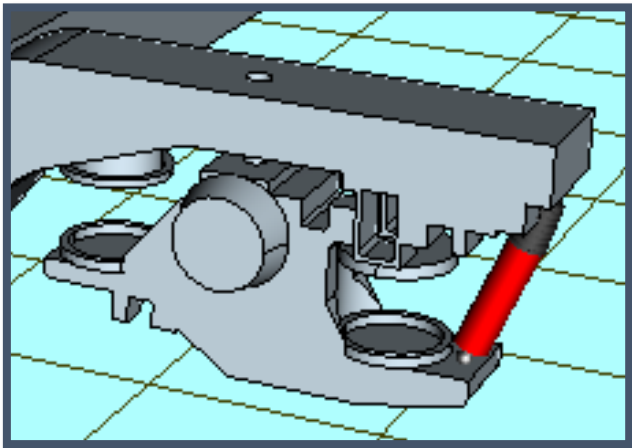


Figura 4.21: Amortiguador Izquierdo Trasero en UM.

Una vez colocados los resortes y los amortiguadores, solamente faltaría colocar las guías binarias para concluir la implementación de la suspensión primaria del tren. El total de guías binarias es de ocho, ya que cada caja de grasa irá unida al bastidor por dos de ellas, una en cada extremo. La función de estas barras es el guiado de las cajas de grasa y aportar rigidez longitudinal al conjunto. A través de la Norma Técnica de Mantenimiento del bogie de la Serie 446 se calcula que cada guía aporta una rigidez de 10.890 (N/m) en la dirección de su longitud. Para crear las guías en UM se sigue el mismo procedimiento que para la creación de los amortiguadores, pero en vez de introducir un coeficiente de amortiguamiento, se va a introducir el valor de la constante de rigidez de las barras. Será necesario ir creando las bielas una a una en su posición correspondiente. Debido al reducido tamaño de las mismas, se ha decidido por simplificación no introducir ninguna imagen en el modelo para representarlas gráficamente. Aunque las bielas no se muestren gráficamente en el modelo, a la hora de la simulación el comportamiento del tren va a ser como si sí estuvieran. En la Figura 4.22 se pueden ver los parámetros introducidos para crear la guía exterior de la Caja_IT.

Name:

Comments/Text attribute C:

Body 1: Body 2:

GO:

☐ Autodetection

Attachment points

CAJA_IT:

BASTIDOR:

Length:

$F = F_0 - c \cdot (x - x_0) - d \cdot v + Q \cdot \sin(w \cdot t + a)$

Force (F0):

Stiffness coef. (c):

Coordinate (x0):

Damping coef. (d):

Amplitude (Q):

Frequency (w):

Initial phase (a):

Figura 4.22: Parámetros Guía Exterior Izquierda Trasera en UM.

6. IMPLEMENTACIÓN DEL RESTO DEL TREN:

Para simular el comportamiento en recta del tren se ha decidido que, por simplicidad, en vez realizar el montaje del tren al completo con todos sus elementos, se van a simular el comportamiento en recta de los coches Motor y Remolque por separado. Ambos coches poseen los mismos bogies y lo que cambia entre ambos es el peso que han de soportar, es decir, el valor de su tara y del número de pasajeros que pueden transportar. Por lo tanto, se introducen dos fuerzas en el lugar en el que se apoyan las balonas neumáticas de la suspensión secundaria, lugar donde se ejercería sobre el bogie el peso de las cajas del tren, en representación de dicho esfuerzo. Se van a simular los comportamientos en recta por separado de los bogies Motor y Remolque cuando se encuentra el vagón vacío (tara), con ocupación media de pasajeros y con ocupación máxima de pasajeros. Los datos de las taras de los coches y de su ocupación se encuentran en el *Capítulo 2.1 - El Tren de la Serie 446*. Para definir el peso de los pasajeros se utilizará el valor medio del peso de los ciudadanos españoles, de en torno a 68 kilogramos [17]. Para calcular “F” se realiza la suma de la tara del coche y el peso de los pasajeros, y se le resta el peso de los dos bogies que tienen cada coche. Luego se divide este peso entre los dos bogies sobre los que apoya cada caja y entre los dos puntos de apoyo que se ejercen en cada bogie.

Las dos fuerzas “F” que se han de ejercer en el bogie según cada caso son las siguientes:

- Coche Remolque vacío:

$$F = \frac{(44.200 - 6.950 * 2) \left(\frac{kg}{coche\ Remolque} \right) * 9,8 \left(\frac{N}{kg} \right)}{2 \left(\frac{bogies}{coche} \right) * 2 \left(\frac{Fuerzas}{bogie} \right)} = 74.235 (N)$$

- Coche Motor vacío:

$$F = \frac{(61.200 - 12.800 * 2) \left(\frac{kg}{coche Motor} \right) * 9,8 \left(\frac{N}{kg} \right)}{2 \left(\frac{bogies}{coche} \right) * 2 \left(\frac{Fuerzas}{bogie} \right)} = 87.220 (N)$$

- Coche Remolque a media ocupación:

$$F = \frac{(44.200 + 125 * 68 - 6.950 * 2) \left(\frac{kg}{coche Remolque} \right) * 9,8 \left(\frac{N}{kg} \right)}{2 \left(\frac{bogies}{coche} \right) * 2 \left(\frac{Fuerzas}{bogie} \right)} = 95.060 (N)$$

- Coche Motor a media ocupación:

$$F = \frac{(61.200 + 119 * 68 - 12.800 * 2) \left(\frac{kg}{coche Motor} \right) * 9,8 \left(\frac{N}{kg} \right)}{2 \left(\frac{bogies}{coche} \right) * 2 \left(\frac{Fuerzas}{bogie} \right)} = 107.045,4 (N)$$

- Coche Remolque a ocupación máxima:

$$F = \frac{(44.200 + 250 * 68 - 6.950 * 2) \left(\frac{kg}{coche Remolque} \right) * 9,8 \left(\frac{N}{kg} \right)}{2 \left(\frac{bogies}{coche} \right) * 2 \left(\frac{Fuerzas}{bogie} \right)} = 115.885 (N)$$

- Coche Motor a ocupación máxima.

$$F = \frac{(61.200 + 237 * 68 - 12.800 * 2) \left(\frac{kg}{coche Motor} \right) * 9,8 \left(\frac{N}{kg} \right)}{2 \left(\frac{bogies}{coche} \right) * 2 \left(\frac{Fuerzas}{bogie} \right)} = 126.704,2 (N)$$

Las fuerzas se van a implementar en el modelo a través de la colocación de fuerzas que se mantengan constantes en el tiempo a través del comando **T-Forces**. Para cada caso se introducirán las fuerzas que correspondan para simular el peso que el tren ejerce sobre el bogie. Se va a introducir un valor de tiempo muy elevado (10.000 segundos) para el valor del tiempo que duran las fuerzas, y así asegurar que estas se van a mantener durante todo el tiempo a analizar.

De esta forma se llega a la conclusión del montaje e implementación del tren de la Serie 446 en Universal Mechanism y el modelo estará listo para las simulaciones.

En la Figura 4.23 se puede observar el resultado del montaje del tren de cercanías de la Serie 446 en UM listo para ser simulado, con las fuerzas “F” que simulan la carga del tren señaladas.

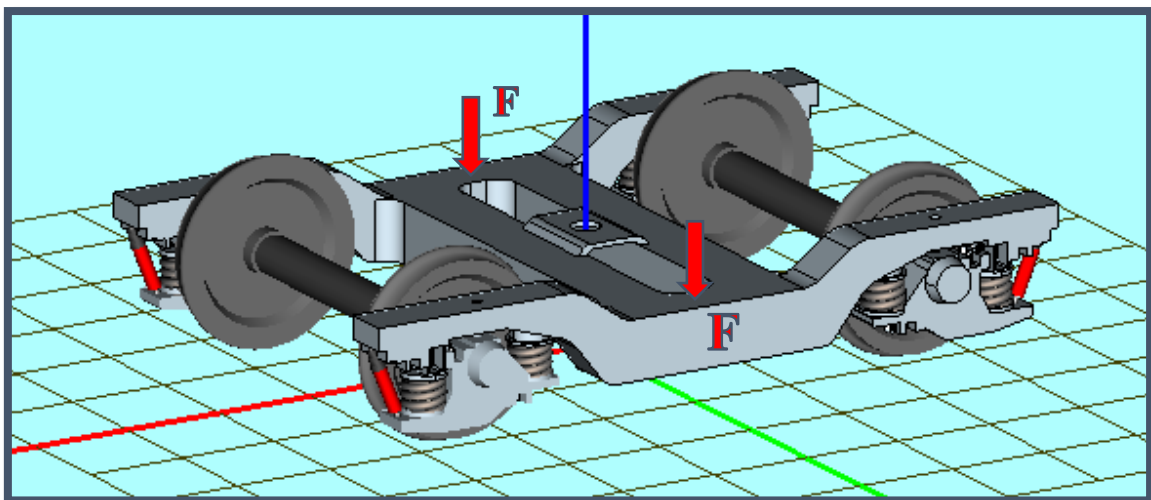


Figura 4.23: Vista Isométrica Bogie de la Serie 446 en UM.

En la Figura 4.24 se muestran las vistas del montaje del bogie del tren de la 446 en el programa Universal Mechanism.

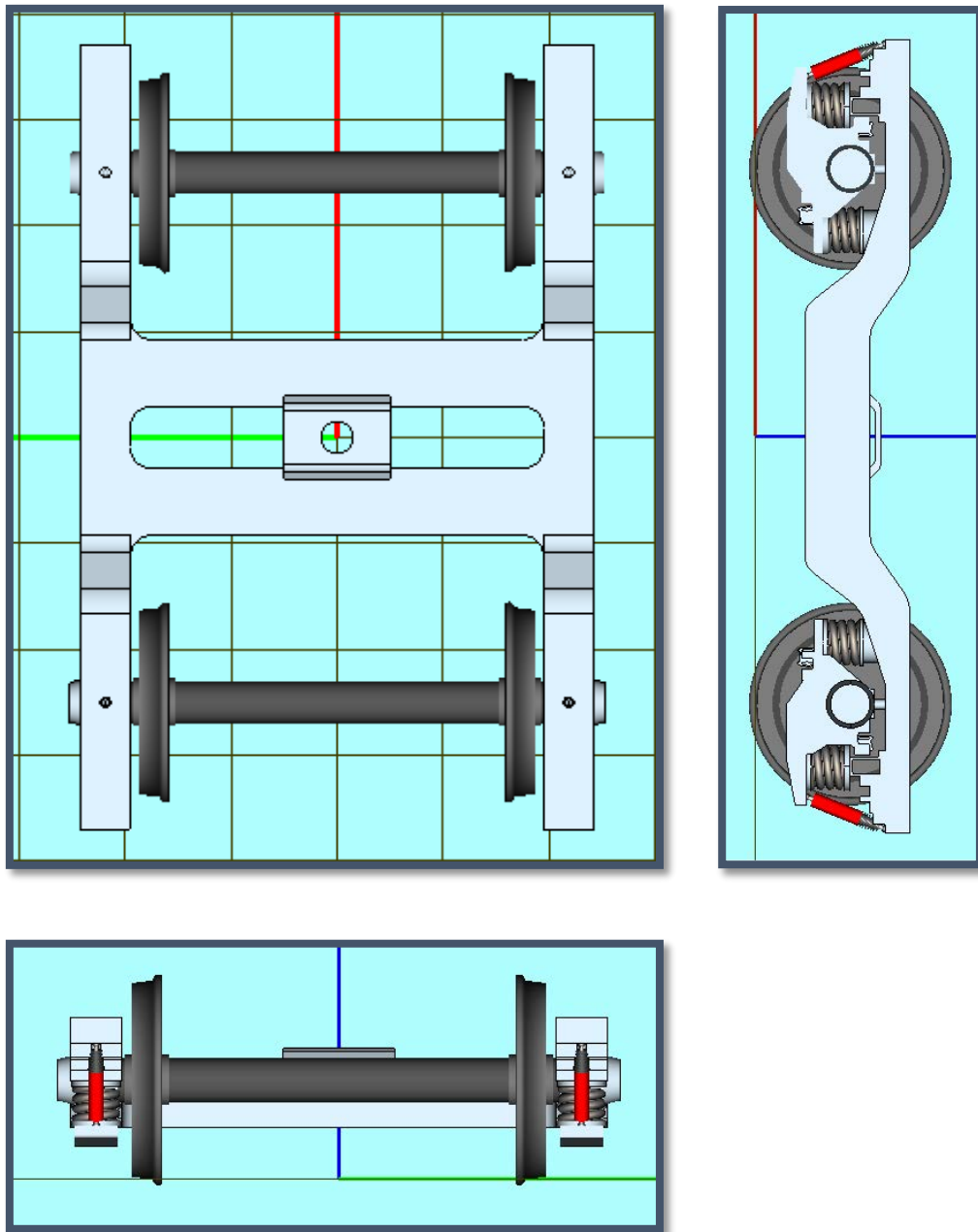


Figura 4.24: Vistas Bogie de la Serie 446 en UM.

4.3. PREPARACIÓN Y REALIZACIÓN DE LAS SIMULACIONES.

Para la realización del análisis de la estabilidad en recta del tren de cercanías de la Serie 446 se van a realizar las siguientes simulaciones:

- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula vacío** para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...). Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie motor** cuando el **tren circula vacío** para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...). Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...). Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie motor** cuando el **tren circula a media carga** (119 pasajeros por cada coche motor) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...). Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a carga máxima** (250 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...). Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.

- Desplazamiento del **bogie motor** cuando el **tren circula a carga máxima** (237 pasajeros por cada coche motor) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...). Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.

Las simulaciones anteriores permitirán estudiar como varía la estabilidad en recta del tren según la carga que este posee. Para analizar cómo cambia el comportamiento del cercanías en función de los parámetros que definen la suspensión del tren se realizan las siguientes simulaciones:

- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con un **coeficiente de amortiguación** en los amortiguadores **del 70%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con un **coeficiente de amortiguación** en los amortiguadores **del 80%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con un **coeficiente de amortiguación** en los amortiguadores **del 90%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.

- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con un **coeficiente de amortiguación** en los amortiguadores **del 130%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con una **constante de rigidez** en los resortes helicoidales **del 70%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con una **constante de rigidez** en los resortes helicoidales **del 80%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con una **constante de rigidez** en los resortes helicoidales **del 120%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.
- Desplazamiento del **bogie remolque** cuando el **tren circula a media carga** (125 pasajeros por cada coche remolque) para velocidades entre 20 m/s y 110 m/s cada 5 m/s (20, 25, 30, 35,...) con una **constante de rigidez** en los resortes helicoidales **del 130%** del valor original. Para calcular la velocidad crítica del tren se afinará la búsqueda con incrementos de velocidad de 1 m/s entre las velocidades en las que se comience a producir el movimiento de lazo.

Para cada caso se van a obtener los valores de la posición, la velocidad y la aceleración laterales en un recorrido de 600 metros. Además se estudiará la presencia de ciclos límite y se obtendrán los planos de fase para cada caso. También se hallará la gráfica que relaciona la velocidad a la que circula el vehículo con la amplitud máxima de desplazamiento lateral producida.

A continuación se van a explicar, de manera detallada, los pasos que hay que seguir para realizar la primera simulación. Esta es la simulación del comportamiento en recta del bogie remolque cuando circula sin pasajeros.

Para la realización de simulaciones se utiliza el programa **UM Simulation**. Una vez abierto el programa, se ha de crear un nuevo proyecto a través del comando **New Project**. A continuación se abre una ventana de trabajo en la pantalla donde aparecen todos los comandos que se van a utilizar. Con el proyecto ya creado, se utiliza el comando **Add family of alternatives** de la pestaña **Alternatives** para cargar el modelo del bogie de la Serie 446, seleccionando dicho archivo. Para efectuar los pasos que siguen a continuación se va a trabajar con las pestañas que aparecen en la sección **Alternatives**. Como se va a realizar la simulación para diferentes valores de la velocidad del tren (v_0), se deberá señalar en la pantalla de trabajo. Para ello, en la pestaña **Hierarchy of parameters** se selecciona **Whole List** en la lista de parámetros y se pulsa **v_0** . Después será necesario introducir uno a uno todos los valores para los cuales se va a efectuar el análisis, es decir, de 20 a 110 m/s cada 5 m/s. En la Figura 4.25 se muestra la introducción en UM de la velocidad como parámetro a variar en las simulaciones y, entre paréntesis, los valores que esta va a tomar.

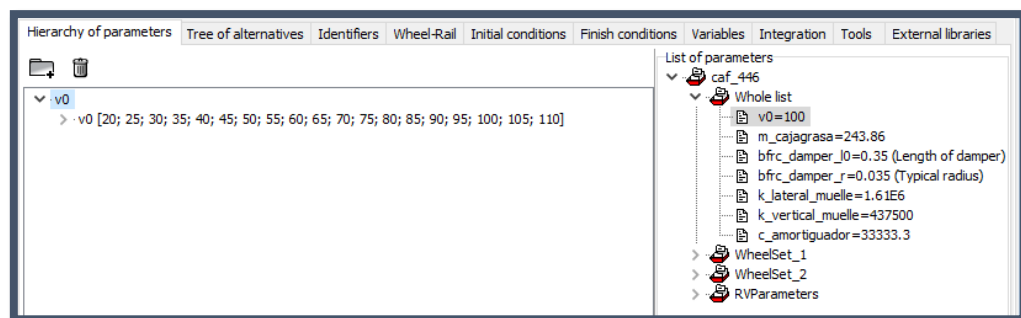


Figura 4.25: Selección de la velocidad como parámetro a modificar.

Después habrá que establecer la configuración del carril. Para la realización del análisis del comportamiento en recta se va a introducir una irregularidad lateral en las vías para así forzar la aparición de un posible movimiento de lazo en el tren y así poder estudiar su estabilidad. Las irregularidades se establecen siguiendo el camino **Alternatives | Wheel-Rail | Track | Irregularities**. Una vez dentro de la pestaña de irregularidades, habrá que seleccionar el tipo de irregularidades a los que están sometidos los carriles. Universal Mechanism posee un banco de archivos de diferentes irregulares. Para este caso se carga el archivo **NoIrregularities.way** para las irregularidades verticales (no habrá ninguna irregularidad vertical para este estudio) y el archivo **g10_20.way** para las irregularidades laterales en ambos carriles. Estas irregularidades laterales introducidas producirán un impulso de la desviación lateral de los ejes de una amplitud de 20 milímetros a los 30 metros de la circulación del tren. En la Figura 4.26 se muestra la pantalla de trabajo con los pasos a seguir para la implementación de las irregularidades en las vías, mientras que en la Figura 4.27 se muestra la gráfica que relaciona la amplitud lateral en milímetros de las irregularidades laterales introducidas con el avance en metros del tren.

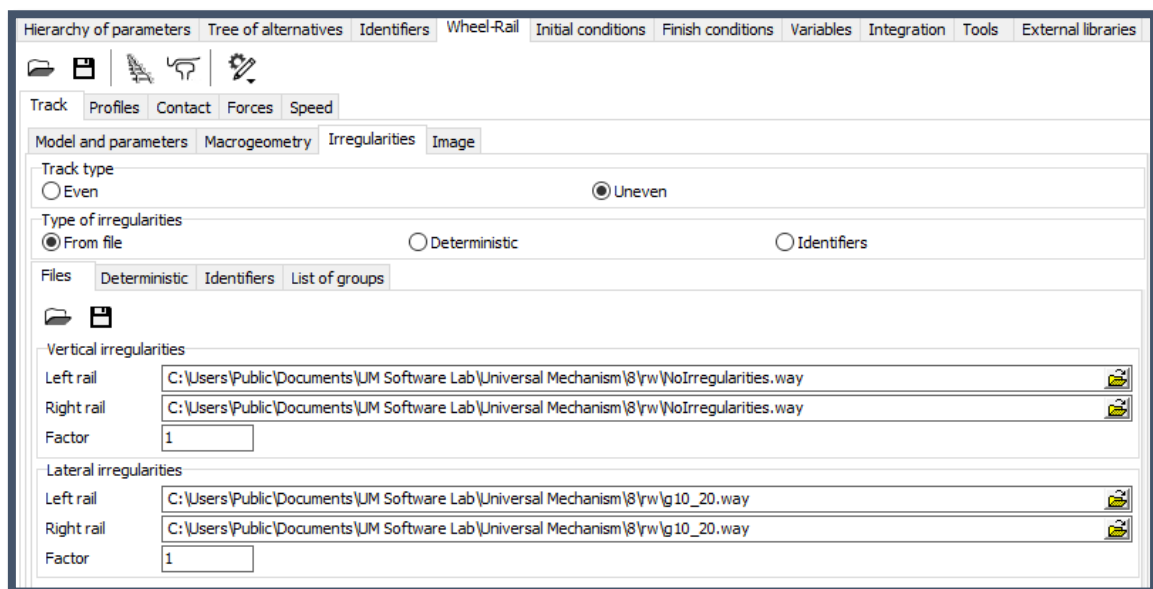


Figura 4.26: Irregularidades en UM.

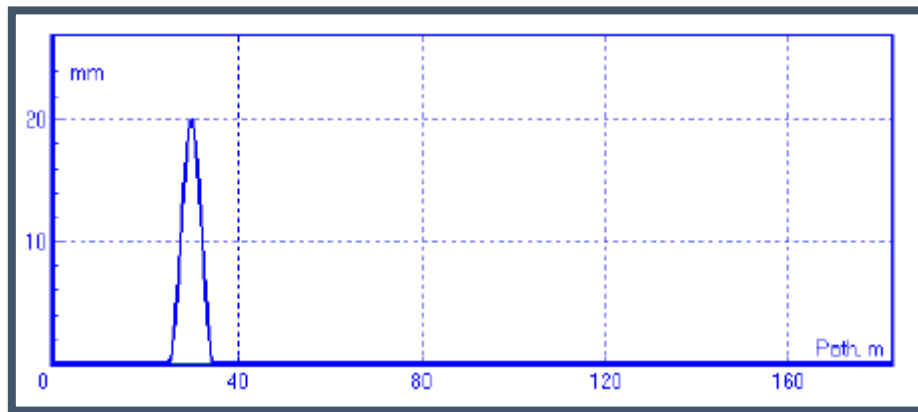


Figura 4.27: Irregularidad lateral g10_20.

Con las irregularidades ya definidas, el siguiente paso es seleccionar que la vía va a ser una recta a lo largo de todo el recorrido. Se sigue el camino **Alternatives | Wheel-Rail | Track | Macrogeometry** y se selecciona **Tangent** como tipo de vía. En la Figura 4.28 se muestra dicha selección.

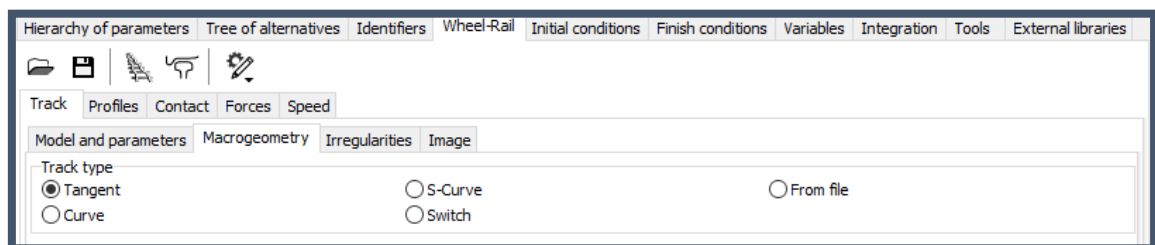


Figura 4.28: Selección del Tipo de Vía.

Se procede a la selección de la forma de los perfiles que van a tomar tanto las ruedas del tren como los carriles de la vía durante el estudio. Para implementar dichos perfiles se ha de seguir el camino **Alternatives | Wheel-Rail | Profiles**. Se carga el archivo del perfil S1002 para las ruedas, y el UIC60New para los carriles. Estos perfiles son los que poseen las ruedas y las vías de trenes de cercanías en España.

En la Figura 4.29 se puede observar la geometría en milímetros de la sección de dichos perfiles. En color morado se representa el perfil S1002 de las ruedas y en rojo el perfil UIC60 de los carriles.

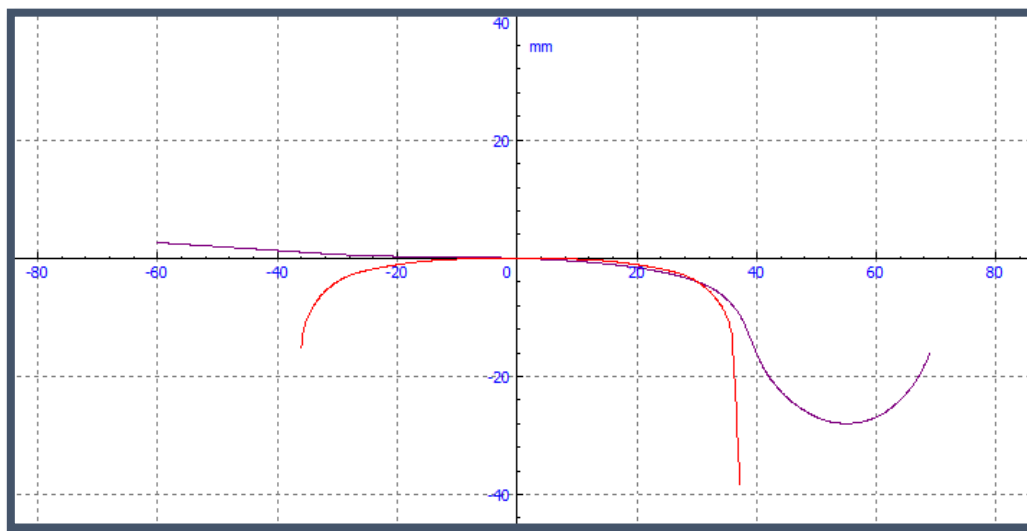


Figura 4.29: Perfil de las Ruedas y de los Carriles.

El resto de parámetros que definen la vía y la interacción de esta con el vehículo se dejarán con los valores por defecto que presenta el programa.

El siguiente paso es establecer los parámetros de integración, es decir, el método que utilizará Universal Mechanism para la obtención de los resultados. Se sigue el camino **Alternatives | Integration | Simulation process parameters** y se selecciona que 'se va a usar el método Park para la integración, **Park solver**. Se establece la tolerancia de error a utilizar (10^{-6}) y se marca la utilización de jacobianos para los cálculos. Además, se señala que la simulación se detenga en caso de descarrilamiento del tren.

El menú que define los parámetros del proceso de simulación que van a ser utilizados para el análisis se muestra en la Figura 4.30.

De esta forma los parámetros de integración que seguirá el programa quedan definidos.

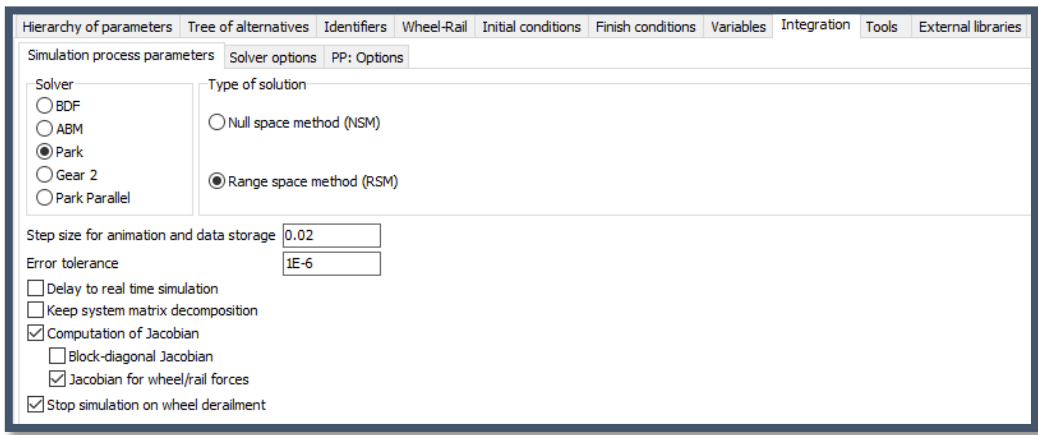


Figura 4.30: Parámetros de Integración.

Se han de establecer las condiciones de parada de la simulación. Para ello se utiliza la pestaña **Finish conditions** y se define que una vez haya circulado el tren durante 600 metros la simulación concluya.

Por último se ha indicar las variables que el programa va a guardar de cada simulación para la obtención de los resultados. Estas variables son la posición, velocidad y aceleración laterales del eje delantero, del eje trasero y del bastidor del bogie; y la distancia recorrida por el vehículo. A través de estas variables se obtendrán todas las gráficas necesarias para el estudio. Para indicarlasy, se ha de utilizar la pestaña **Variables** e ir introduciendo estas una a una a través del uso del comando **Wizard of variables**. En la Figura 4.31 se muestran las variables seleccionadas en el programa.

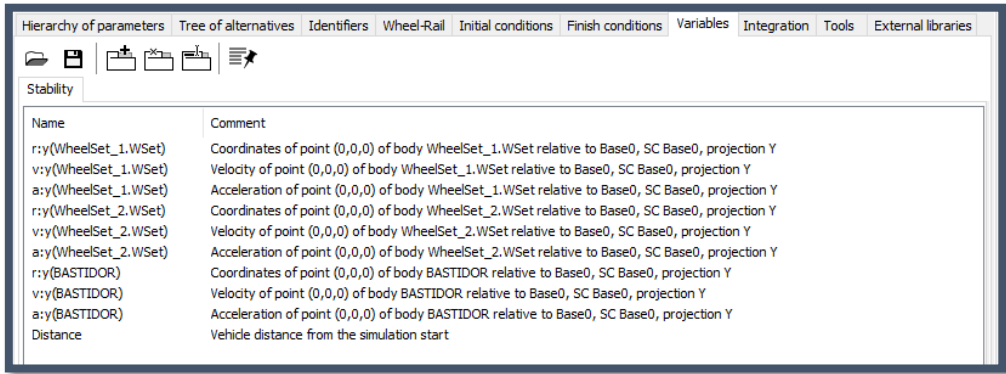


Figura 4.31: Lista de Variables de Cálculo.

De esta manera puede darse inicio al proceso de simulación. Para simular el modelo se utiliza la pestaña **Run** de la pantalla de trabajo. En la Figura 4.32 se puede observar una imagen del proceso de simulación, mientras que en la Figura 4.33 la representación gráfica del tren de la Serie 446 en UM Simulate colocado en la vía, preparado para ser simulado.

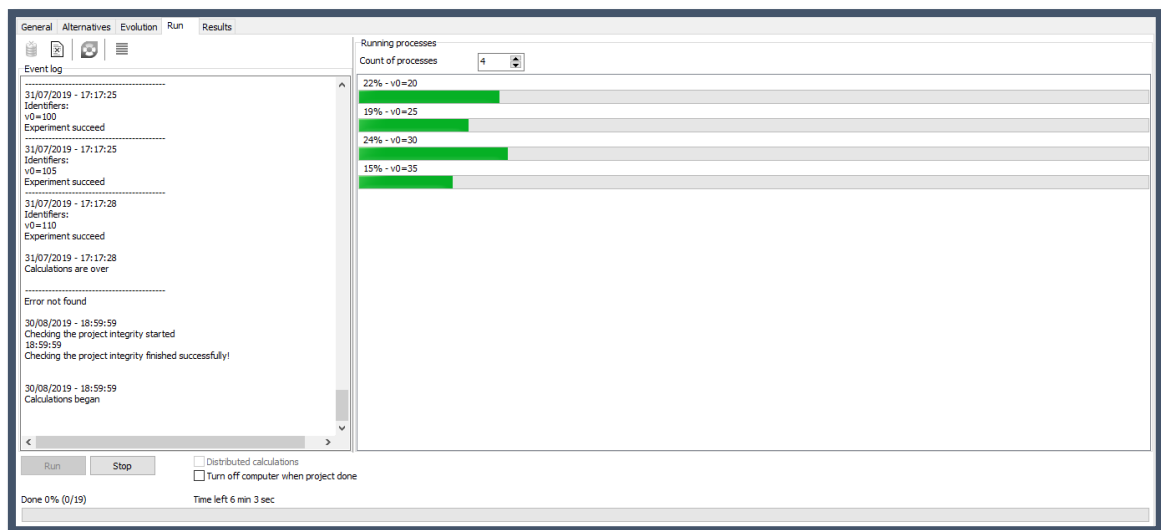


Figura 4.32: Proceso de Simulación.

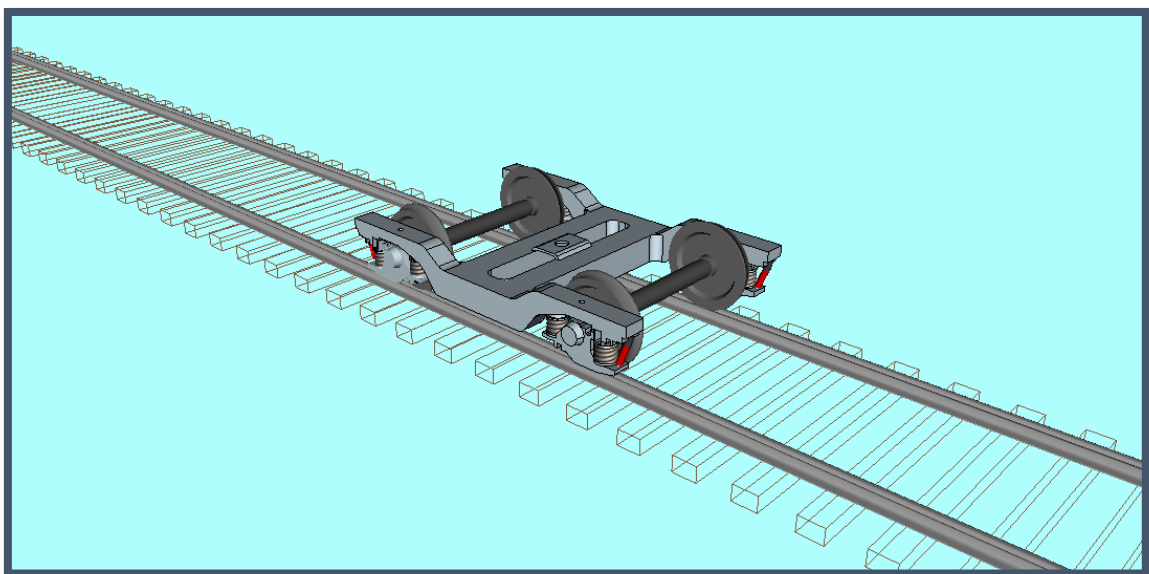


Figura 4.33: Serie 446 en UM Simulate.

Una vez realizada la primera simulación se obtendrá entre que valores de la velocidad del tren se produce la velocidad crítica y se realiza una nueva simulación aumentando la velocidad del vehículo cada 1 m/s entre dichos valores. Así se conseguirá averiguar la velocidad crítica del tren.

De la misma manera que se ha realizado el primer caso de estudio, se llevarán a cabo el resto. En el siguiente capítulo se presentan los resultados del “Análisis de la Estabilidad en Recta de un Tren de Cercanías”.

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los diferentes ensayos realizados con la finalidad de la consecución del análisis de la estabilidad en recta del tren de cercanías de la Serie 446.

Los resultados obtenidos para cada caso son la velocidad crítica del modelo; los valores de la posición, velocidad y aceleración laterales en función de la distancia recorrida; los planos de fase para cada caso cuando el tren circula a 20 m/s, a velocidad crítica y a 110 m/s; y la gráfica que relaciona los valores de la amplitud lateral producida en función de la velocidad a la que circula el vehículo. La velocidad crítica se calcula como el valor de velocidad al cual el tren comienza a efectuar el movimiento de lazo. Los valores de la posición, velocidad y aceleración laterales se calcularon para los dos ejes de ruedas y para el bastidor del bogie pero, debido a que los resultados en los tres lugares son muy parecidos, se van a presentar en el informe solo los del primer eje de ruedas.

En primer lugar se muestran los resultados del ensayo en cuestión y, posteriormente, se realiza su análisis.

Tras exponer los resultados de cada ensayo se realizará una síntesis general de los mismos en el *apartado 5.15*.

Se recuerda que los ensayos realizados son:

1. Coche remolque en vacío.
2. Coche motor en vacío.
3. Coche remolque a media carga.
4. Coche motor a media carga.
5. Coche remolque con máxima ocupación.
6. Coche motor con máxima ocupación.

7. Coche remolque a media carga con amortiguadores trabajando al 70%.
8. Coche remolque a media carga con amortiguadores trabajando al 80%.
9. Coche remolque a media carga con amortiguadores trabajando al 90%.
10. Coche remolque a media carga con amortiguadores trabajando al 130%.
11. Coche remolque a media carga con resortes trabajando al 70%.
12. Coche remolque a media carga con resortes trabajando al 80%.
13. Coche remolque a media carga con resortes trabajando al 90%.
14. Coche remolque a media carga con resortes trabajando al 130%.

5.1. PRIMER ENSAYO: COCHE REMOLQUE EN VACÍO.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 40 m/s - 144 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.1 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 40 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

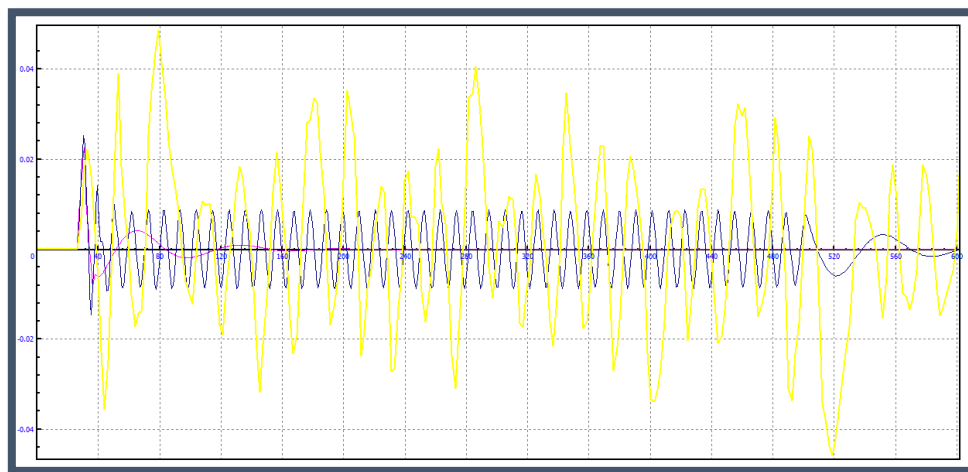


Figura 5.1: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 1.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.2 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 40 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

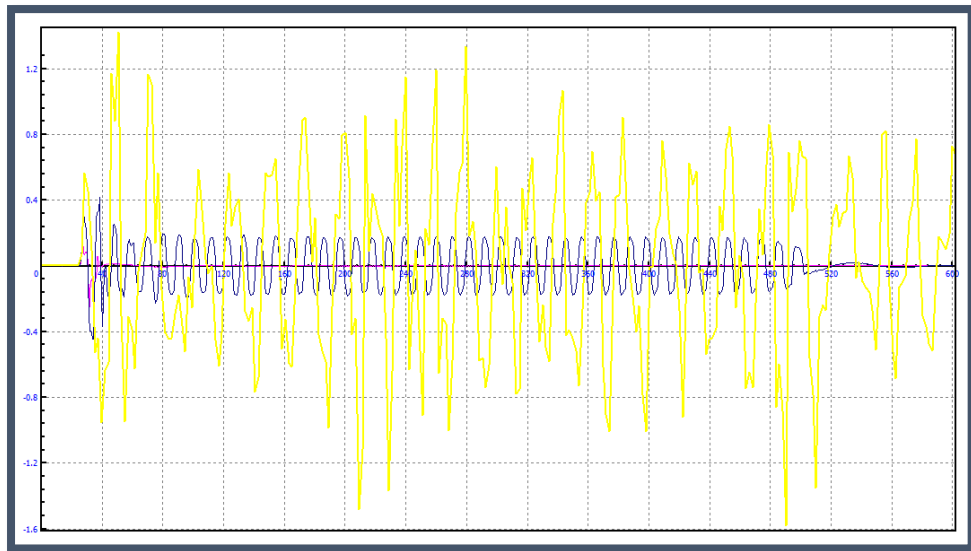


Figura 5.2: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 1.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.3 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 40 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

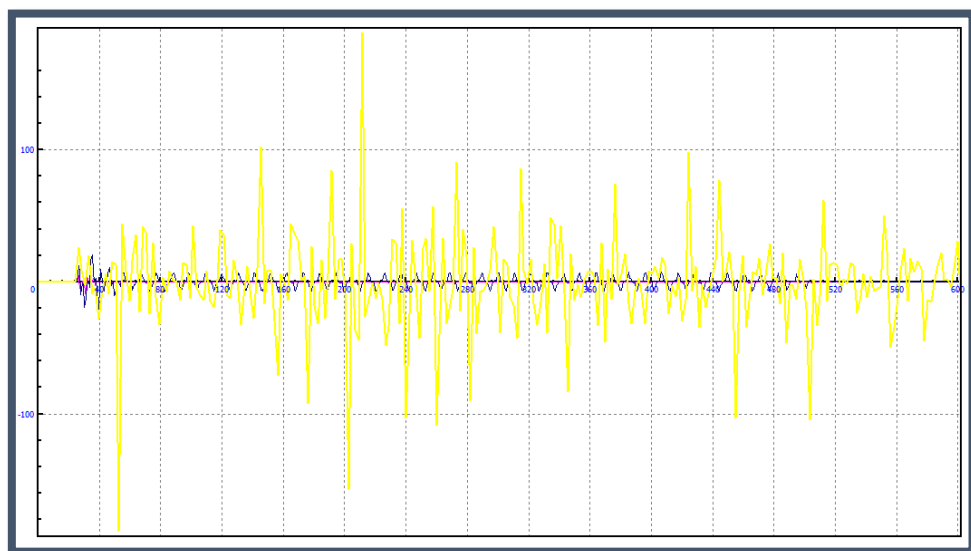


Figura 5.3: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 1.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.4, Figura 5.5 y Figura 5.6 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 40 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

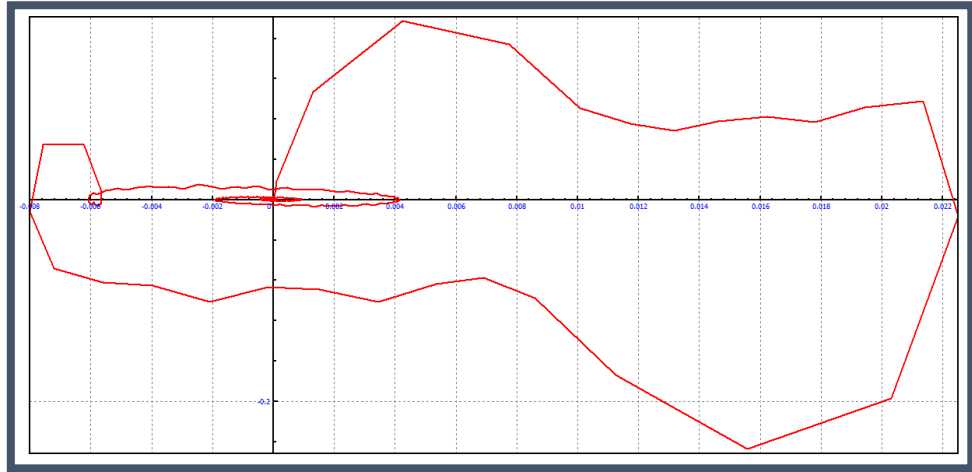


Figura 5.4: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 1.

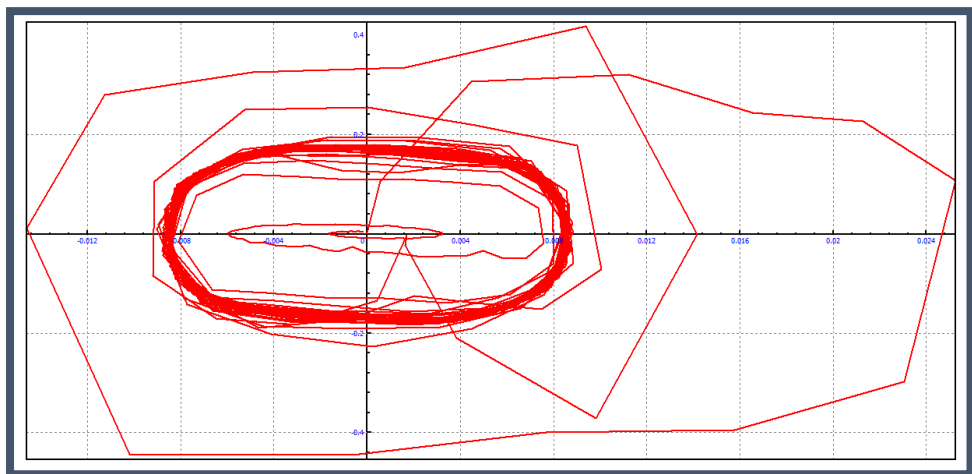


Figura 5.5: Plano de Fase a Velocidad Crítica (40 m/s) del Ensayo 1.

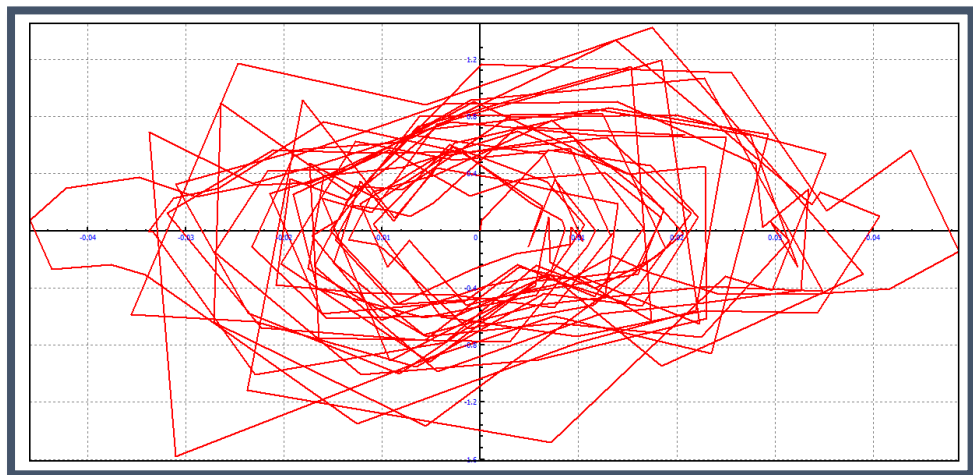


Figura 5.6: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 1.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.7 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

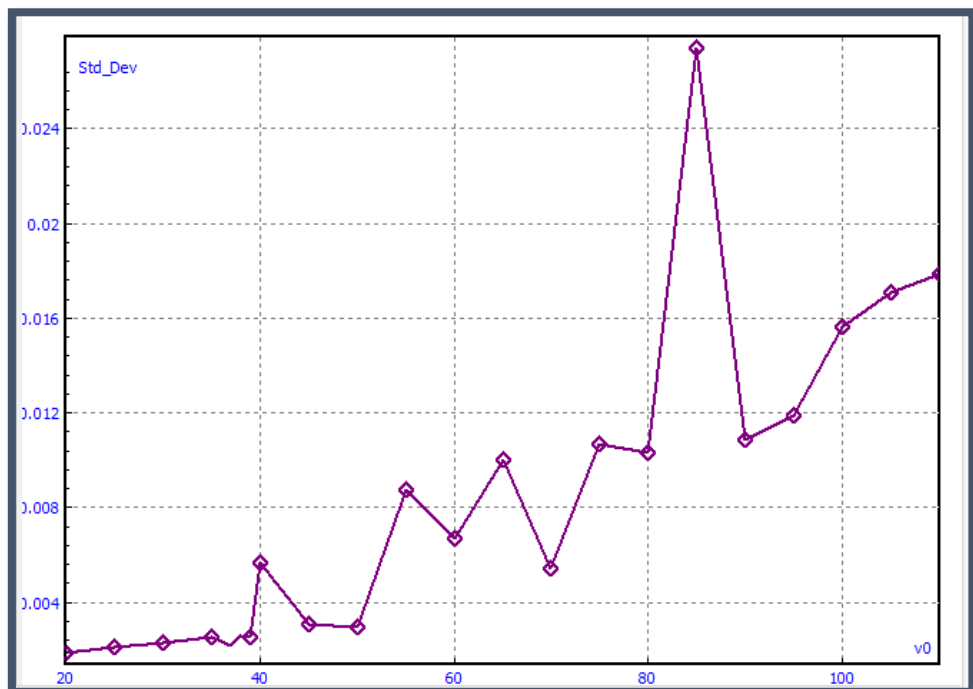


Figura 5.7: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 1.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica del coche remolque del tren de la Serie 446 es de 40 m/s, es decir, 144 km/hora. Para calcularla se ha observado que a partir de dicha velocidad el tren comienza a efectuar un movimiento de lazo, mostrado en color azul en la Figura 5.1. Dicho movimiento de vaivén se mantiene con una amplitud lateral estable a lo largo del tiempo e igual a 0,01 metros. Este movimiento de lazo puede asimilarse a un ciclo límite como se muestra en el plano de fase de la Figura 5.5. Se ve que la relación entre la posición y la velocidad laterales se mantiene de forma cíclica. Este ciclo límite es estable ya que la curva parte desde el punto (0,0) hacia la elipse en la que se formaría el bucle. La velocidad lateral a velocidad crítica varía de manera sinusoidal con un valor de amplitud de en torno a 0,2 m/s (en azul en la Figura 5.2). La aceleración también sigue una función sinusoidal con una amplitud de en torno a $6,5 \text{ m/s}^2$ (mostrado en color azul en la Figura 5.3).

Para el ensayo a 20 m/s, la desviación lateral provocada por la aparición de la irregularidad lateral de la vía queda completamente amortiguada cuando el tren circula durante 150 metros de trayecto. La amplitud lateral máxima que se produce en dicho caso es de 20 milímetros, amplitud del defecto de la vía. El plano de fase de este movimiento, representado en la Figura 5.4, muestra que este no sigue un ciclo límite, al no existir relaciones cíclicas entre la posición y la velocidad laterales del vehículo.

En el estudio realizado para 110 m/s hay que destacar que el caos domina en los resultados obtenidos. En la Figura 5.1, en color amarillo, se puede observar cómo se producen sacudidas de una amplitud lateral superior a los 0,04 metros. Este movimiento es caótico, como se puede apreciar en el plano de fase de la Figura 5.6. A lo largo del desplazamiento del tren se van a producir picos de velocidad superiores a 0,2 m/s y de aceleración de hasta 200 m/s^2 .

Destacar que el ensayo no se ha podido realizar a 85 m/s ya que a dicha velocidad se produce el descarrilamiento del tren por salida del primer eje de los carriles. Esto se puede ver en el pico que aparece en la amplitud lateral máxima para dicha velocidad en la Figura 5.7.

5.2. SEGUNDO ENSAYO: COCHE MOTOR EN VACÍO.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 43 m/s – 154,8 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.8 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

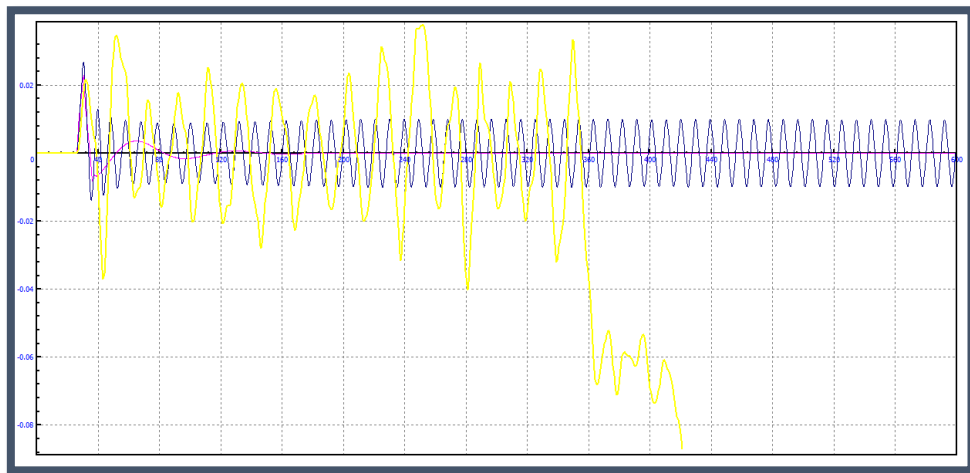


Figura 5.8: Posición Lateral VS Distancia Recorrida de Ensayo 2.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.9 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

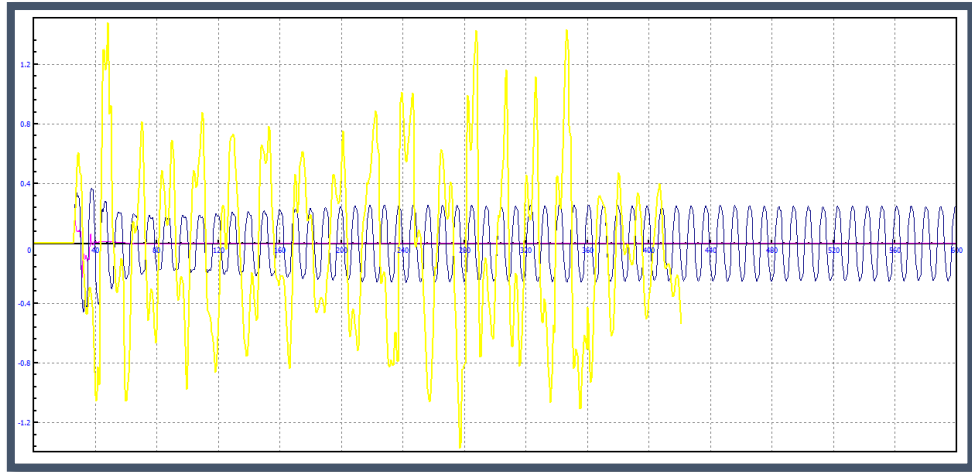


Figura 5.9: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 2.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.10 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

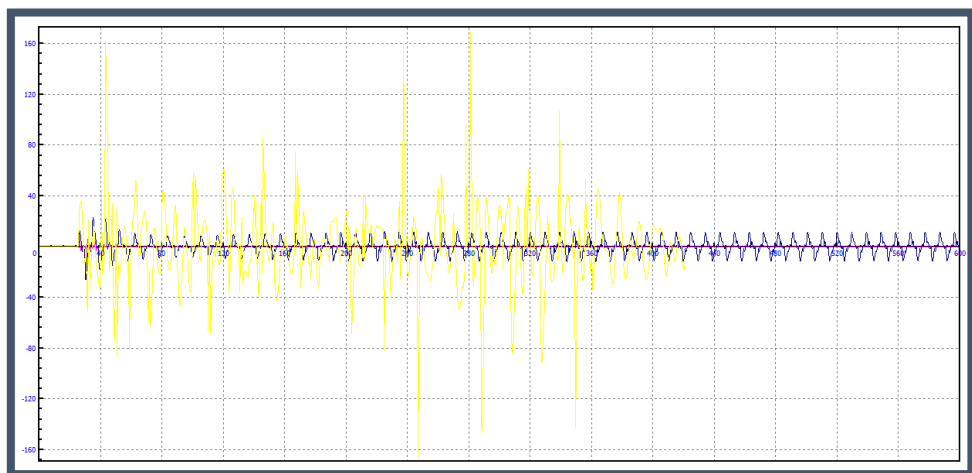


Figura 5.10: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 2.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.11, Figura 5.12 y Figura 5.13 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 43 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

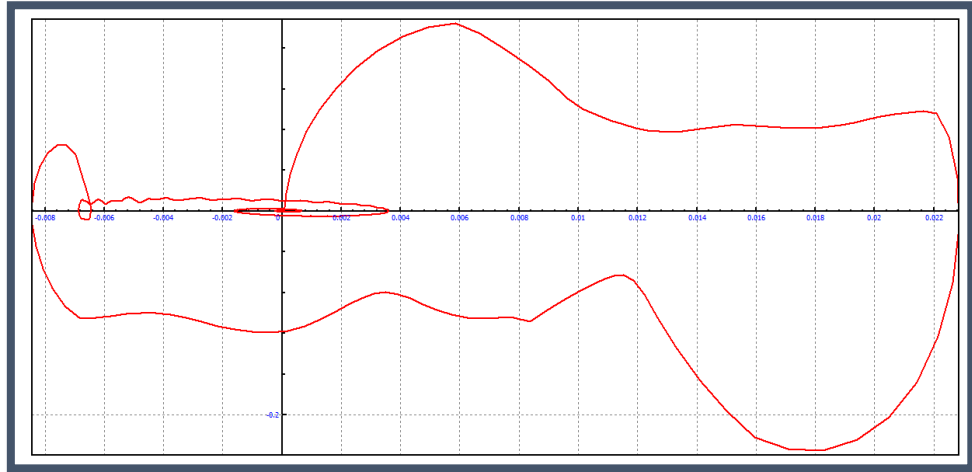


Figura 5.11: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 2.

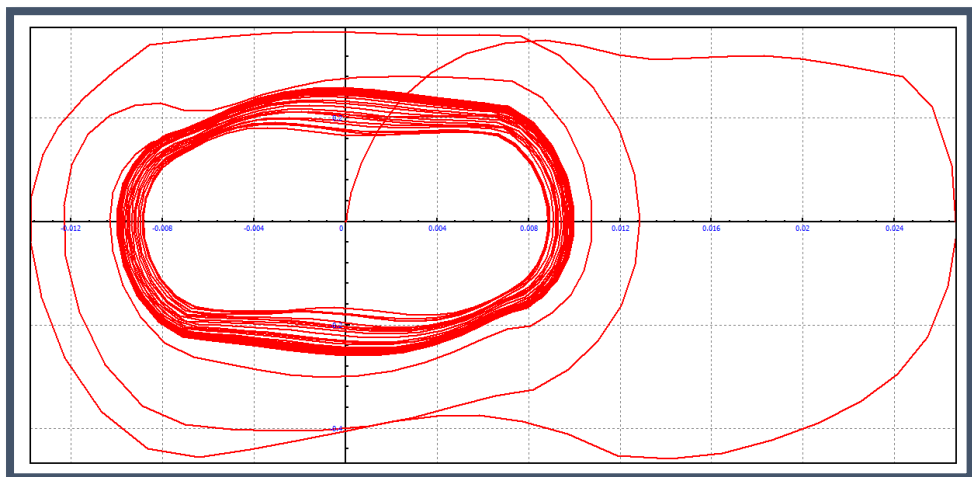


Figura 5.12: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 2.

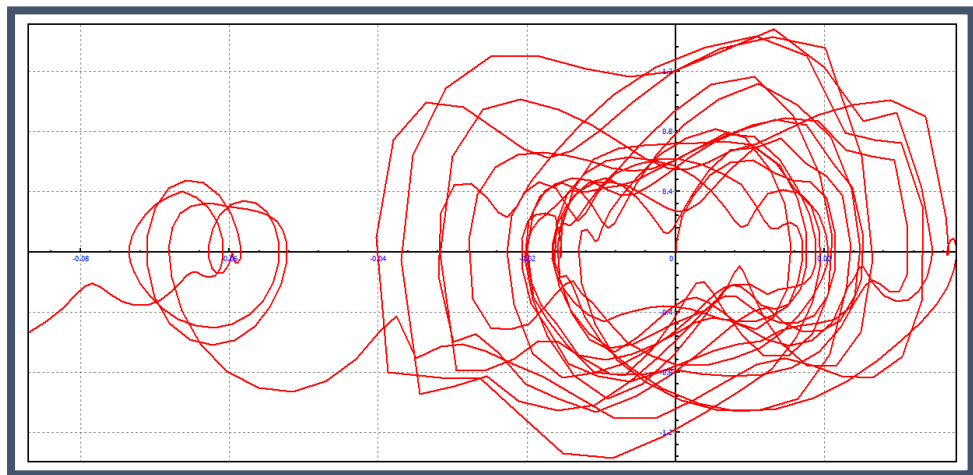


Figura 5.13: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 2.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.14 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

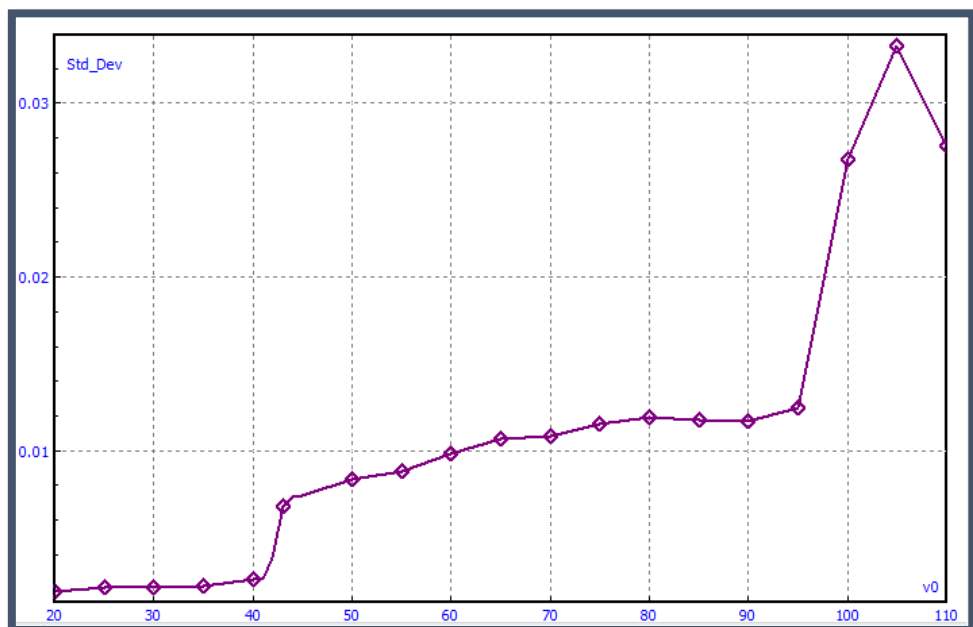


Figura 5.14: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 2.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica del coche motor de la Serie 446 es de 43 m/s, es decir, 154,8 km/h. Se sabe que esta es la velocidad crítica ya que es la velocidad a la cual comienza a efectuarse el movimiento de lazo, representado en color azul en la Figura 5.8. Por lo tanto, se puede concluir que **la velocidad crítica del tren de la Serie 446 cuando circula en vacío es de 144 km/h**, ya que esta es la menor velocidad crítica entre la de los coches motor y remolcado. Del movimiento de lazo producido en el coche motor a velocidad crítica se puede concretar que este posee un comportamiento de ciclo límite estable, como se puede ver en la Figura 5.12. Las funciones de posición, velocidad y aceleración laterales a velocidad crítica con respecto a la distancia recorrida por el vehículo; representadas en color azul en la Figura 5.8, la Figura 5.9 y la Figura 5.10; presentan una trayectoria sinusoidal con amplitudes de en torno a 0,01 m, 0,025 m/s y 15 m/s², respectivamente. Estos valores de posición y velocidad son similares a los producidos en el bogie remolque pero la amplitud máxima de la aceleración que se da en este coche será del doble.

A 20 m/s los resultados obtenidos son muy parecidos a los obtenidos en el primer ensayo.

A 110 m/s se va a producir el descarrilamiento del tren. Este hecho se puede observar en la Figura 5.8, la Figura 5.9 y 5.10 cuando a partir de 440 metros de distancia recorrida por el tren, la amplitud crece desorbitadamente y se dejan de presentar valores. En la Figura 5.13 se puede ver como el plano de fase del vehículo a 110 m/s representa el comportamiento caótico que este presenta y, en la parte izquierda de la imagen, el momento en el que se produce el descarrilamiento.

Para el ensayo de la estabilidad del coche motor en vacío se ha obtenido que el tren descarrila a 100, 105 y 110 m/s. Esto se puede observar en la importante crecida de la amplitud máxima que se da para dichas velocidades en la Figura 5.14. Además en esta misma gráfica de la desviación típica se puede ver el salto que la amplitud máxima da a partir del valor de la velocidad crítica, 43 m/s. Por tanto, el coche motor perderá la estabilidad y descarrilará a velocidades mayores que el remolcado.

5.3. TERCER ENSAYO: COCHE REMOLQUE A MEDIA CARGA.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 43 m/s – 154,8 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.15 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

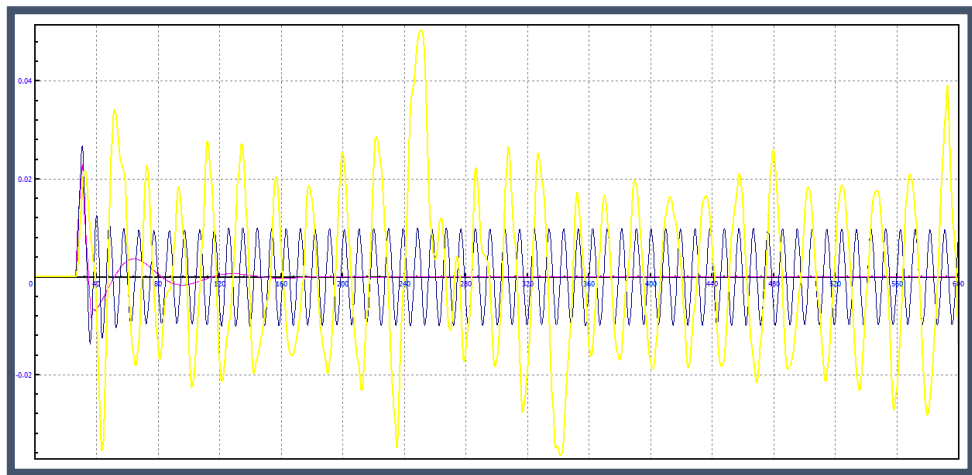


Figura 5.15: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 3.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.16 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

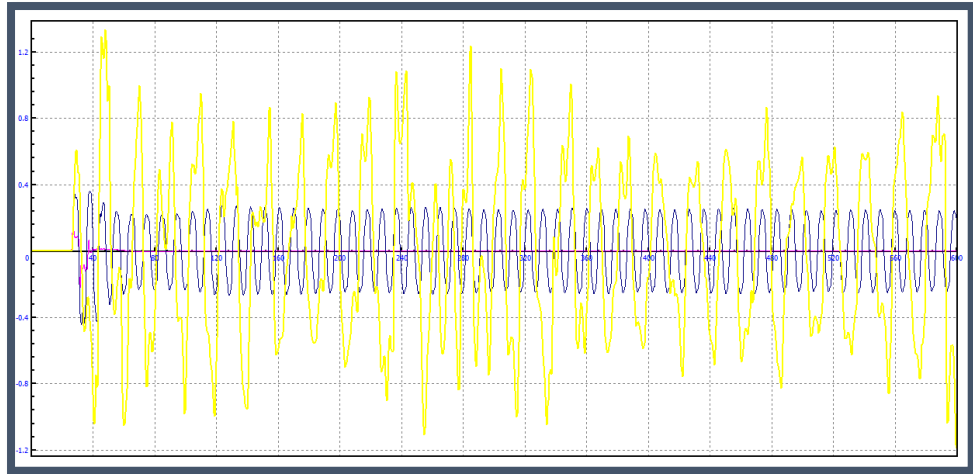


Figura 5.16: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 3.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.17 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

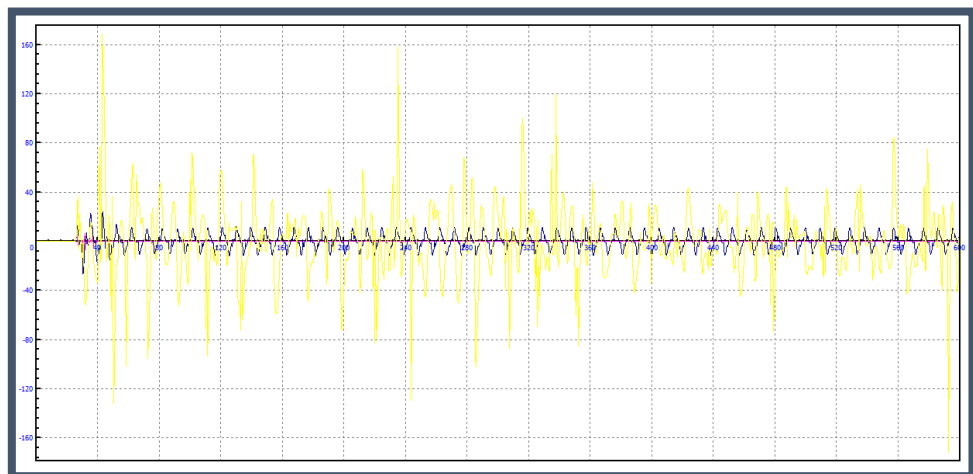


Figura 5.17: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 3.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.18, Figura 5.19 y Figura 5.20 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 43 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

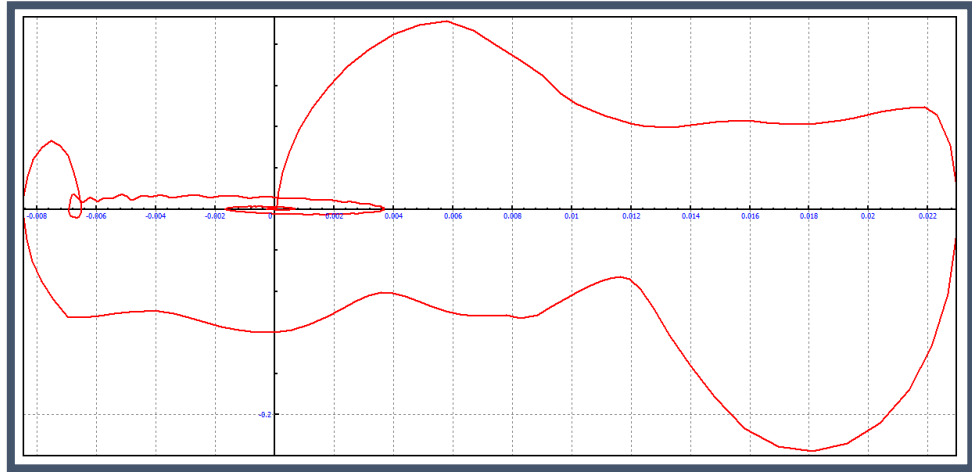


Figura 5.18: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 3.

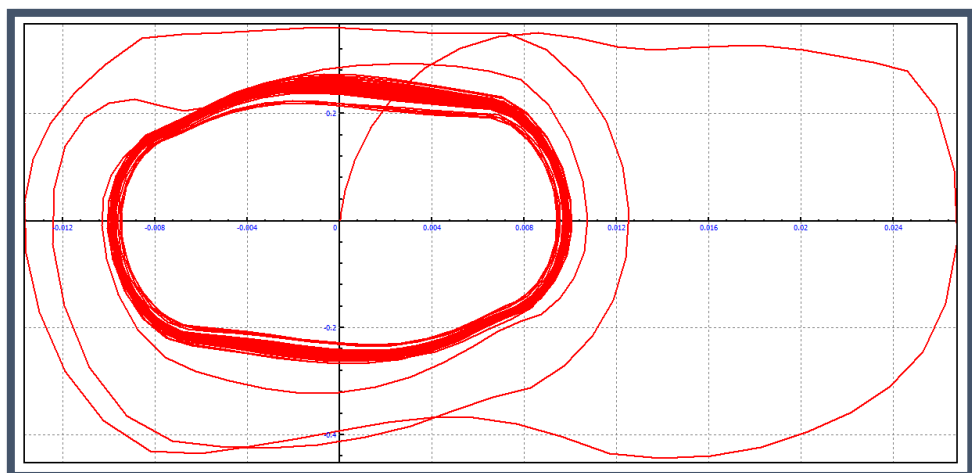


Figura 5.19: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 3.

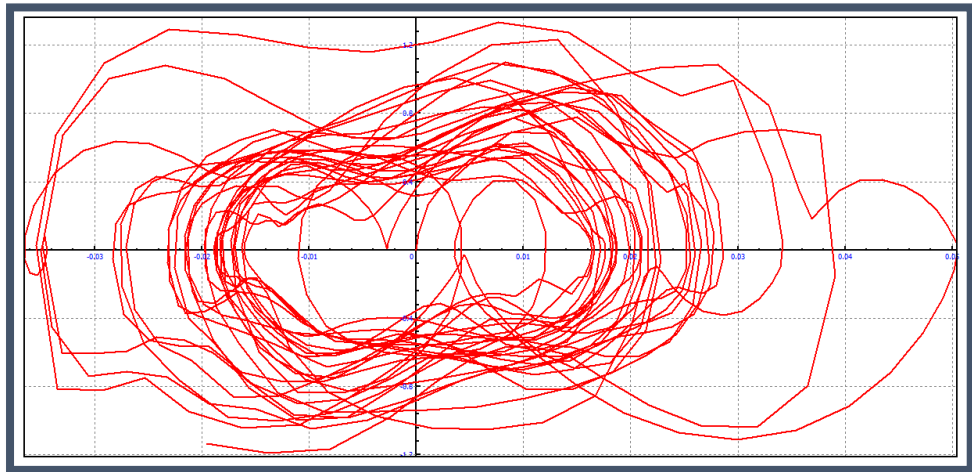


Figura 5.20: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 3.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.21 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

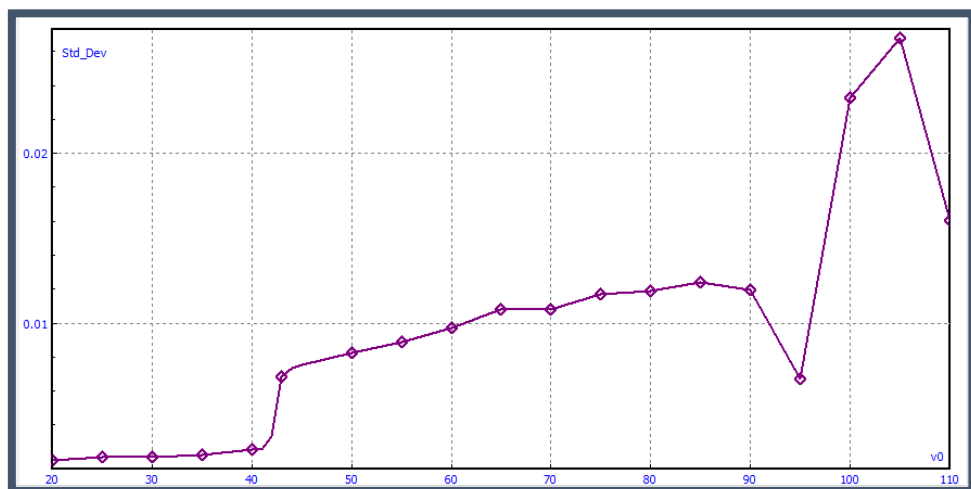


Figura 5.21: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 3.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica, para la cual el vehículo pierde la estabilidad, del coche remolque a media carga es de 43 m/s – 154,8 km/h. A dicha velocidad el tren comienza a desplazarse siguiendo un movimiento de lazo sinusoidal de amplitud de 0,01 metros, representado en la Figura 5.15 en color azul. Este movimiento sigue un ciclo límite estable a lo largo del tiempo como se muestra en la Figura 5.19, entrando en un bucle de movimiento que se mantiene constante a lo largo del tiempo. La velocidad y la aceleración lateral del cercano también seguirán una trayectoria sinusoidal en relación con la distancia recorrida. Sus amplitudes máximas son de 0,3 m/s y de 15 m/s².

Cuando el tren circula a 110 m/s el tren sigue un movimiento caótico, como en ensayos anteriores, sin embargo a dicha velocidad no se va a producir su descarrilamiento. Este caos se aprecia en la falta de cohesión para los valores obtenidos en el plano de fase de la Figura 5.20. Se producen altas sacudidas de velocidad y aceleración laterales, como se puede ver en las gráficas de color amarillo de la Figura 5.16 y la Figura 5.17.

A 20 m/s, la sacudida inicial provocada por la irregularidad inicial de la vía se va a disipar en tan solo 150 metros de recorrido, valor similar al obtenido en casos anteriores. En la 5.18, el plano de fase de este caso, se puede observar como el tren comienza el recorrido a posición y velocidad lateral 0 y, salvado el obstáculo, el tren recupera la estabilidad lateral regresando a dicha posición.

En la Figura 5.21 se pueden observar los valores que toma la amplitud de desplazamiento lateral en función de la velocidad que lleva el tren de la Serie 446. En esta gráfica se pueden ver dos saltos claros, el primero cuando se llega a la velocidad crítica (43 m/s) y el segundo cuando se producen descarrilamientos. Para los casos de estudio se ha averiguado que el tren descarrila en los ensayos en los que circula a 100 y 105 m/s.

5.4. CUARTO ENSAYO: COCHE MOTOR A MEDIA CARGA.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 43 m/s – 154,8 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.22 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

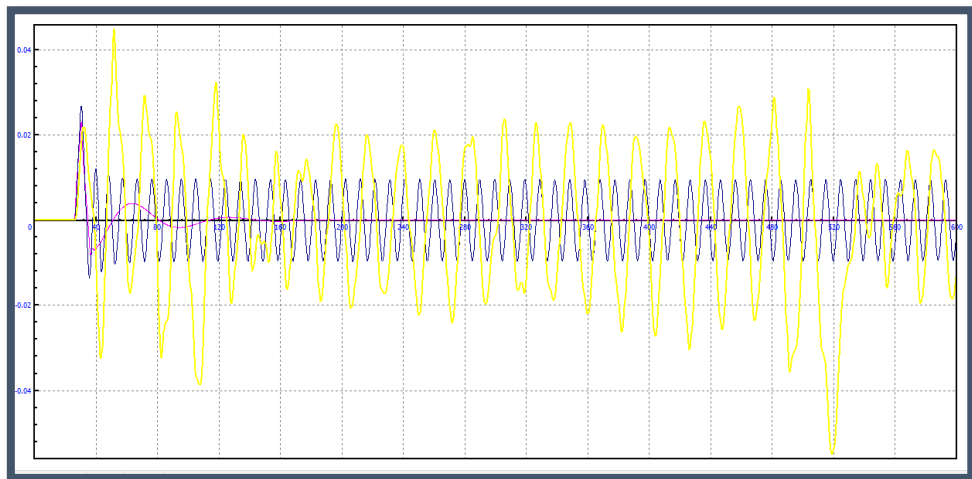


Figura 5.22: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 4.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.23 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

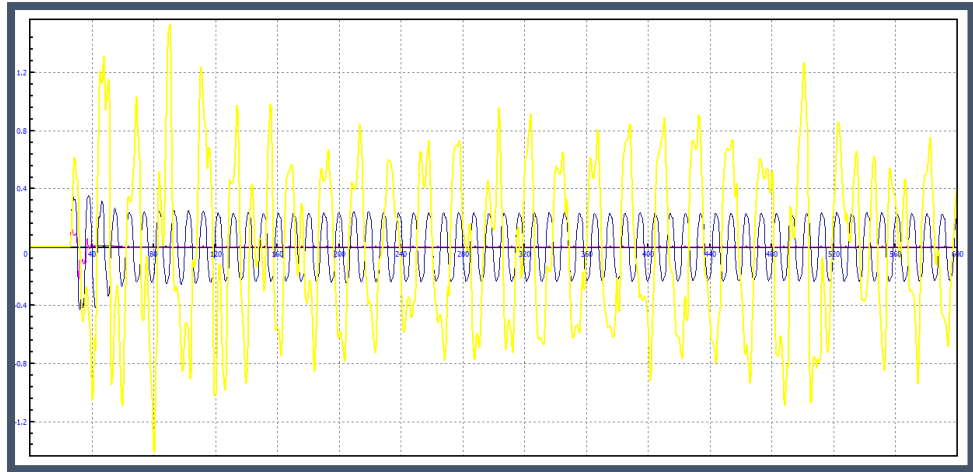


Figura 5.23: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 4.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.24 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

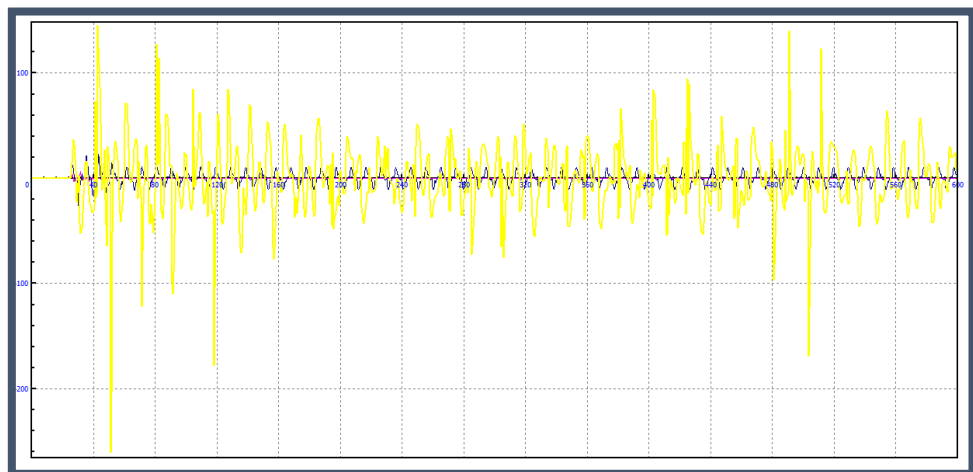


Figura 5.24: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 4.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.25, Figura 5.26 y Figura 5.27 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 43 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

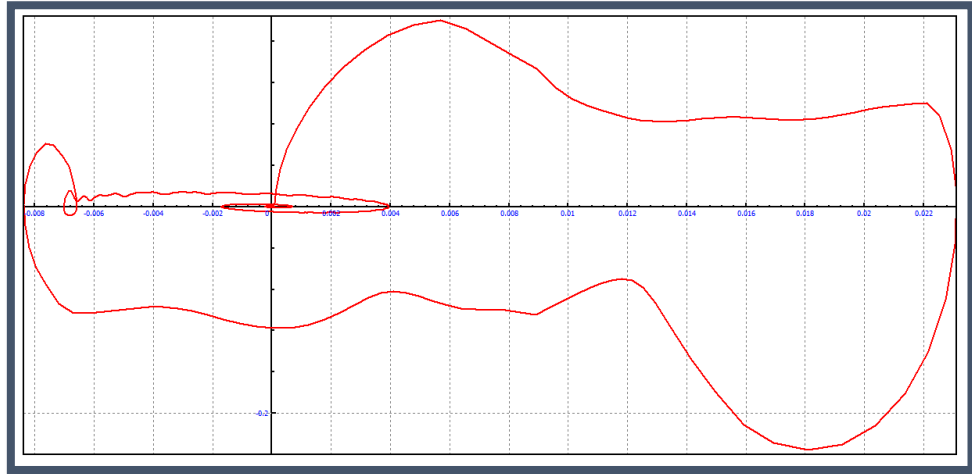


Figura 5.25: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 4.

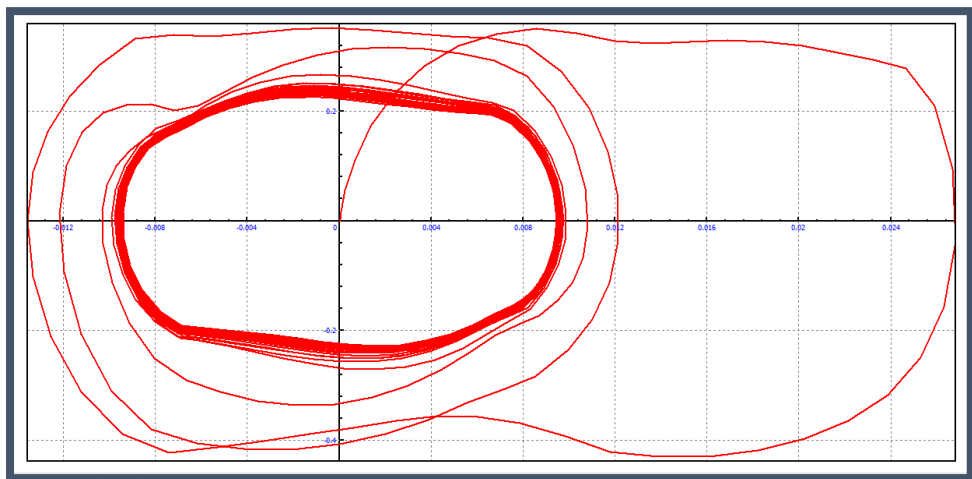


Figura 5.26: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 4.

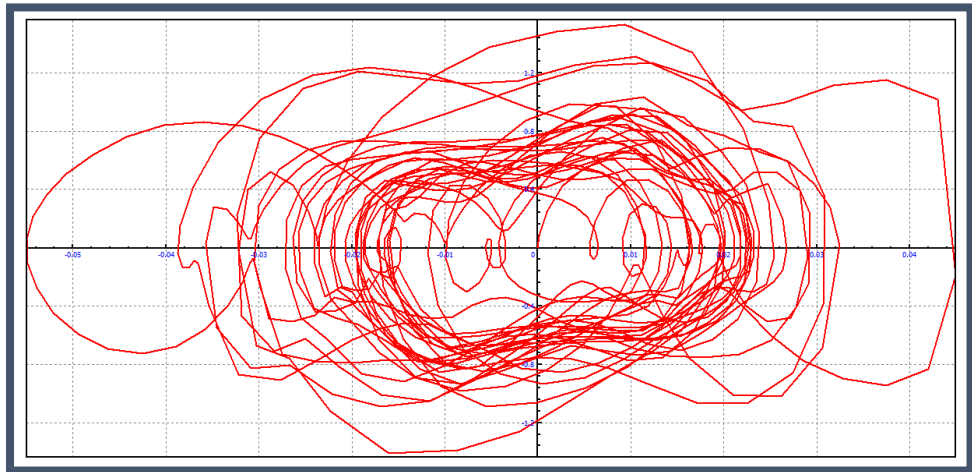


Figura 5.27: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 4.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.28 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

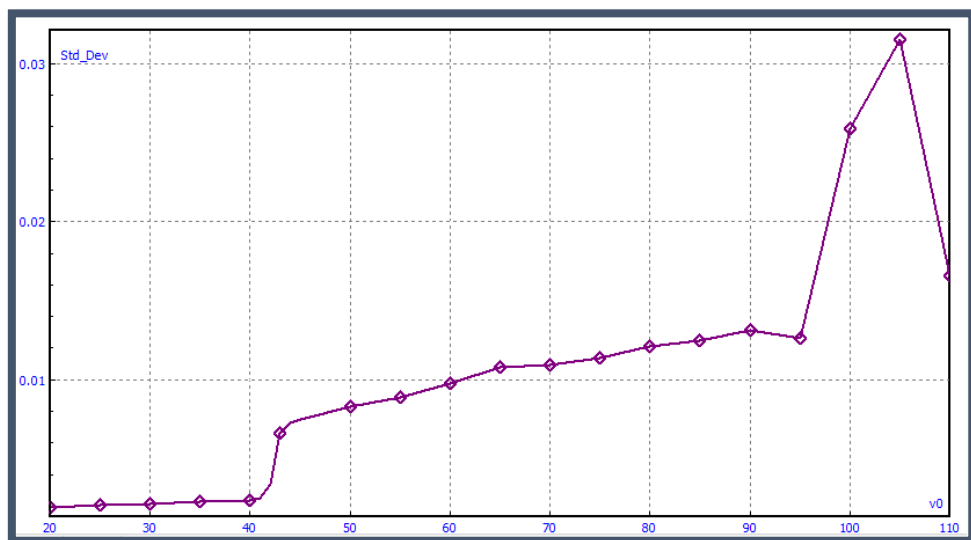


Figura 5.28 Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 4.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida en este caso es de 43 m/s – 154,8 km/h. Al ser este valor el mismo al calculado para el coche remolque, se puede concluir que **la velocidad crítica del tren de la Serie 446 cuando circula a media carga es de 43 m/s.**

Los resultados obtenidos para el coche motor son muy parecidos a los del coche remolque. A velocidad crítica, el tren va a comenzar a moverse en un movimiento de lazo que forma un ciclo límite estable, como se puede ver en la Figura 5.26. Dicho movimiento seguirá un movimiento sinusoidal de amplitudes máximas de posición lateral de 0,025 metros, de velocidad lateral de 0,25 m/s y de aceleración lateral de 12,5 m/s² (Figura 5.22, Figura 5.23 y Figura 5.24, respectivamente). La amplitud de la posición lateral alcanzará por tanto más del doble del valor que el que se produce en el coche remolque, pero, sin embargo, las amplitudes de la velocidad y aceleración laterales cuando se produce el lazo tomarán valores muy parecidos.

A velocidad de 20 m/s el tren amortigua el efecto de la velocidad de manera rápida como en los casos anteriores. Por tanto, se puede concluir que la carga que soporta el vehículo no produce un efecto notable a tan baja velocidad. En el plano de fase de la Figura 5.25 se puede ver como el comportamiento del tren a esta velocidad es similar al producido en el resto de ensayos.

A 110 m/s el tren sigue un movimiento caótico y completamente impredecible, observable en el plano de fase la Figura 5.27. Sin embargo este no llega a descarrilar a dicha velocidad. En este vaivén descontrolado se producen picos de desplazamiento lateral de hasta 0,06 metros, de velocidad lateral de 1,4 m/s y de aceleración lateral de hasta 300 m/s². Circular con estos picos la circulación del tren provocaría grandes daños sobre la salud de los pasajeros.

En la Figura 5.28 se puede ver como la gráfica presenta dos saltos de amplitud máxima de posición lateral importantes. Uno a 43 m/s, velocidad crítica, y otro a valores de velocidad de en torno a 100 y 105 m/s, velocidades a las cuales se va a producir el descarrilamiento del tren.

5.5. QUINTO ENSAYO: COCHE REMOLQUE CON CARGA MÁXIMA.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 44 m/s – 158,4 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.29 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

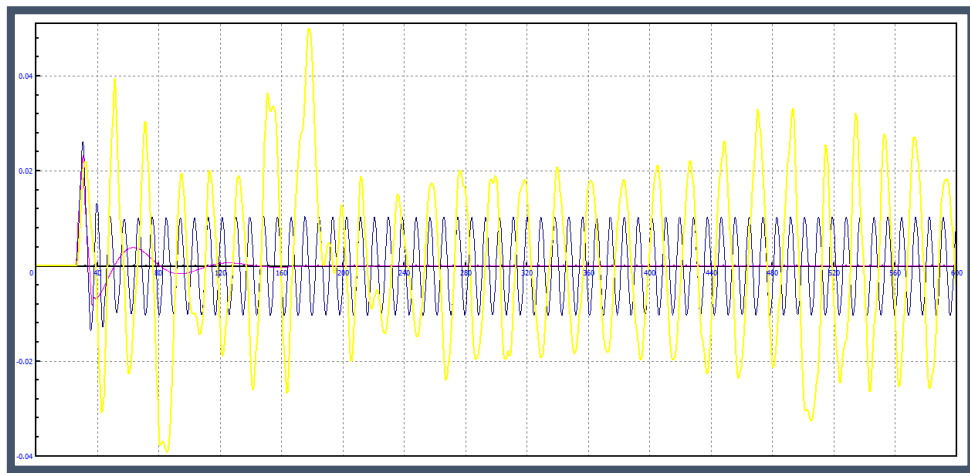


Figura 5.29: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 5.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.30 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

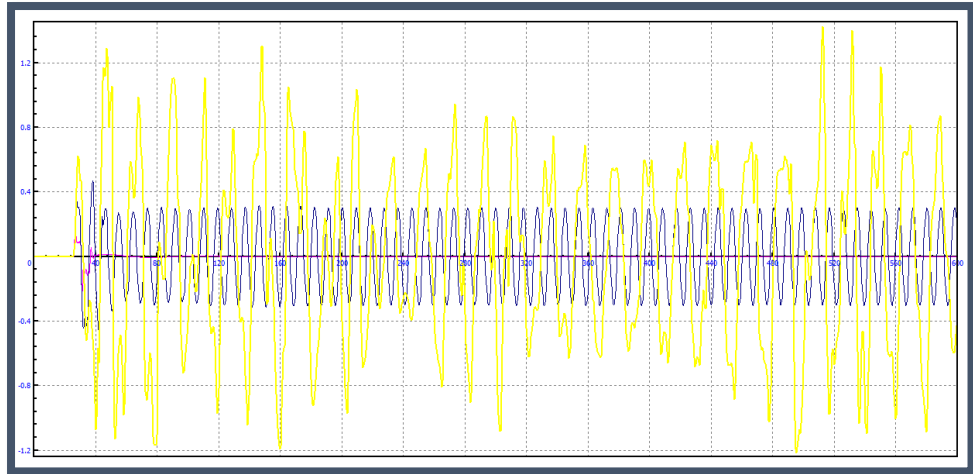


Figura 5.30: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 5.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.31 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

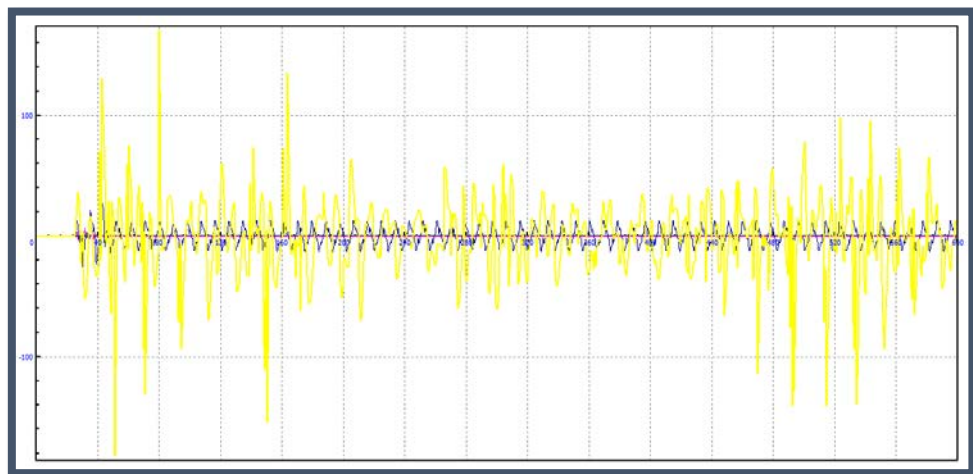


Figura 5.31: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 5.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.32, Figura 5.33 y Figura 5.34 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 44 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

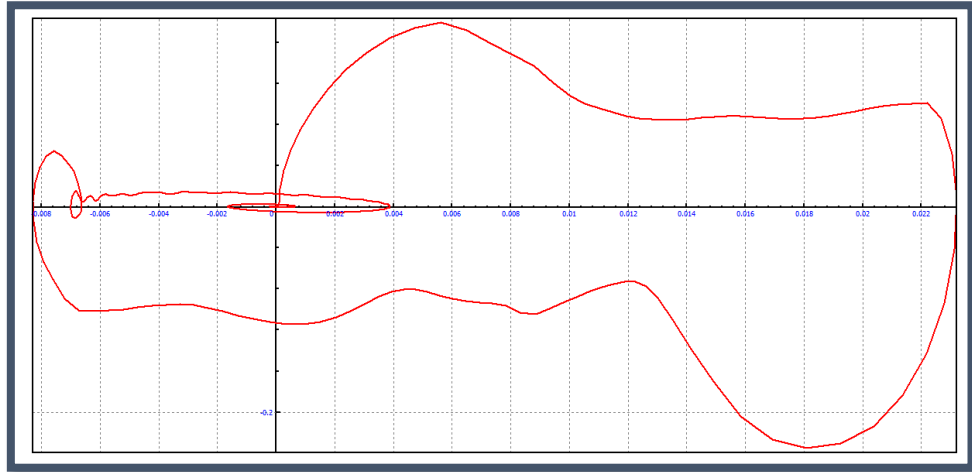


Figura 5.32: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 5.

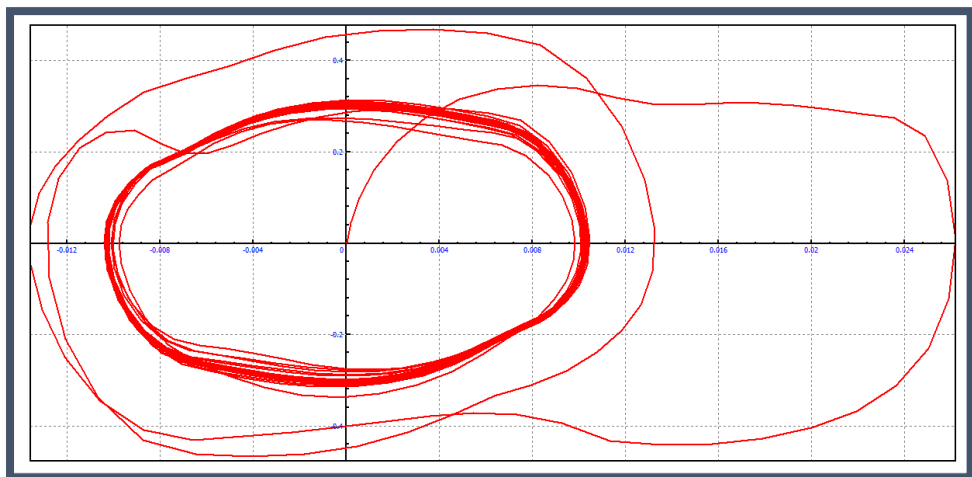


Figura 5.33: Plano de Fase a Velocidad Crítica (44 m/s) del Ensayo 5.

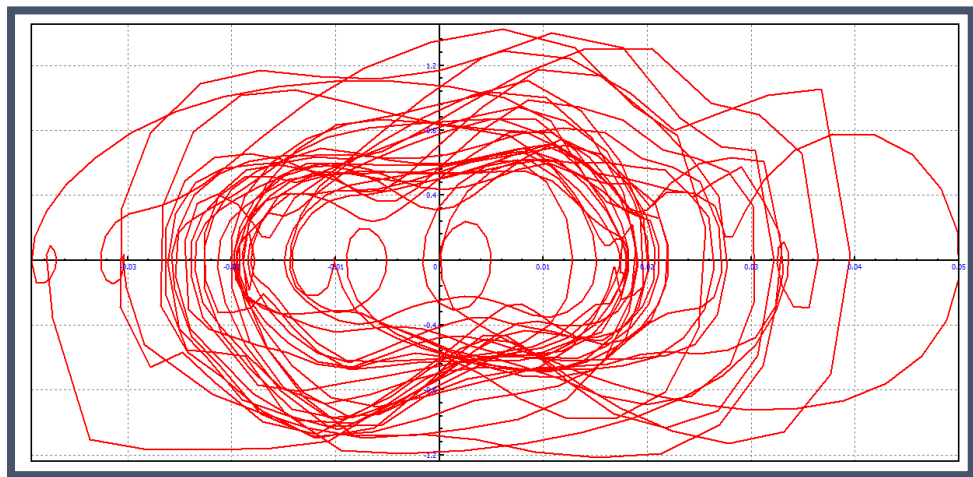


Figura 5.34: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 5.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.35 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

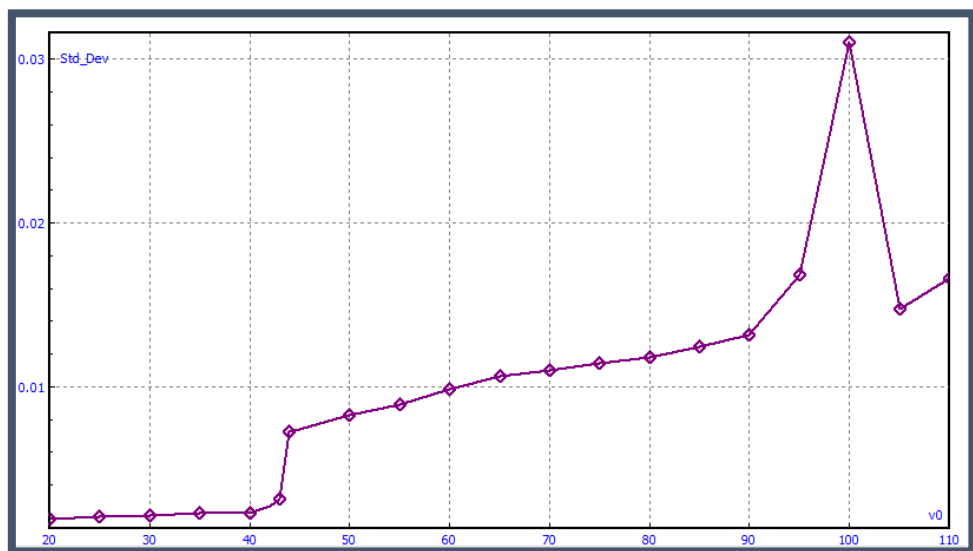


Figura 5.35: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 5.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica, a la cual el coche remolque pierde la estabilidad y comienza a efectuar el lazo, cuando el tren circula bajo carga máxima es de 44 m/s. Esta será 1 m/s mayor que la que se obtuvo para el ensayo a media carga y 4 m/s mayor que el caso en el que la circulación se produce en vacío. Por lo tanto, el coche remolque pierde la estabilidad a velocidades mayores cuanto mayor sea el número de pasajeros que viajan en él. El movimiento de lazo que se produce a velocidad crítica presenta un ciclo límite estable, como se puede observar en la Figura 5.33, ya que se parte de la posición (0,0) y en poco tiempo la curva del plano de fase se introduce en el bucle. La amplitud máxima de posición lateral que se repite en el movimiento de lazo es de 0,01 metros, mitad del valor del desplazamiento lateral provocado por la irregularidad de la vía. La amplitud de la velocidad lateral oscilará entre unos valores máximos de en torno a 0,3 m/s, mientras que la aceleración lateral hace lo propio a valores máximos de 20 m/s².

A 20 m/s los resultados no han variado con respecto a los casos anteriores.

Cuando el tren se desplaza a 110 m/s el tren sigue un movimiento caótico, más estable en cuanto a valores de desplazamiento lateral que en casos anteriores, pero con grandes picos de velocidad y aceleración laterales (1,4 m/s y 200 m/s² respectivamente). Estos datos se representan en las curvas de color amarillo de la Figura 5.29, 5.30 y 5.31.

La gráfica de la Figura 5.35 muestra la amplitud de desplazamiento lateral máxima que se da a cada velocidad de circulación. En ella se aprecian dos saltos, uno a 44 m/s, velocidad crítica a partir de la cual empieza a desarrollarse el movimiento de lazo, y otro a 100 m/s, única velocidad del estudio para la cual se ha obtenido que el coche remolque del tren de la Serie 446 descarrilará.

5.6. SEXTO ENSAYO: COCHE MOTOR CON CARGA MÁXIMA.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 45 m/s – 162 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.36 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 45 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

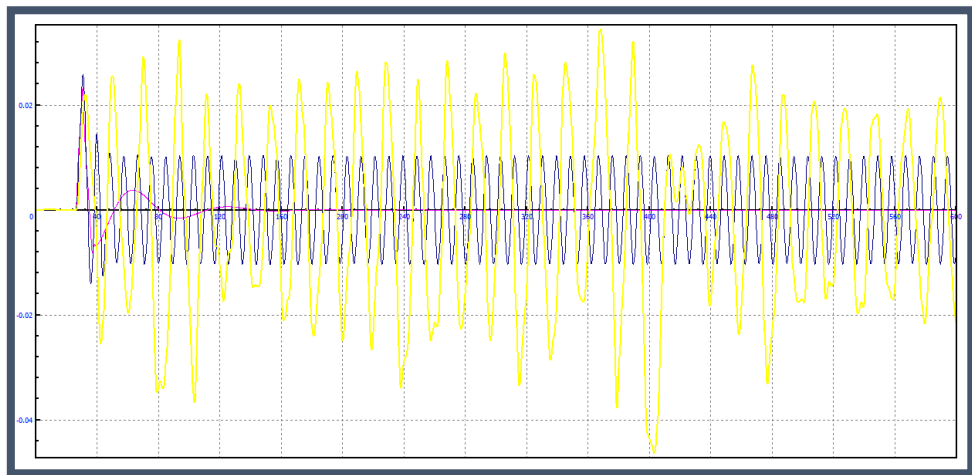


Figura 5.36: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 6.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.37 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 45 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

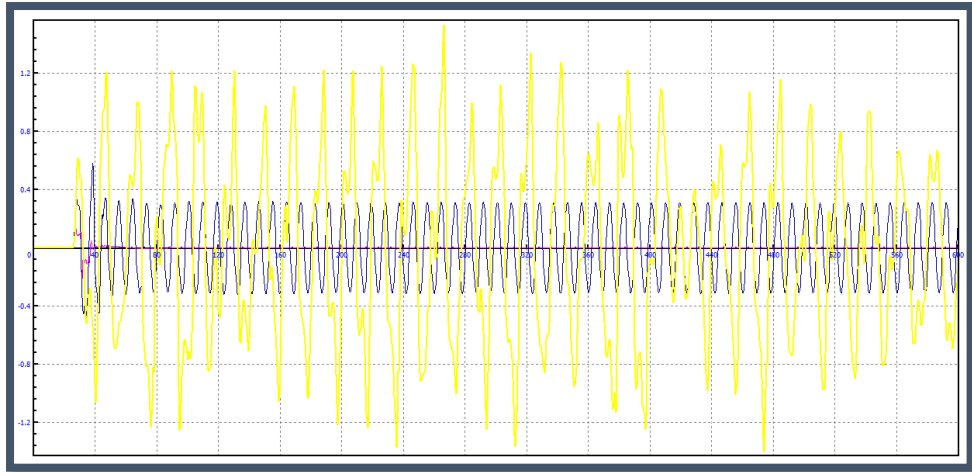


Figura 5.37: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 6.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.38 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 45 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

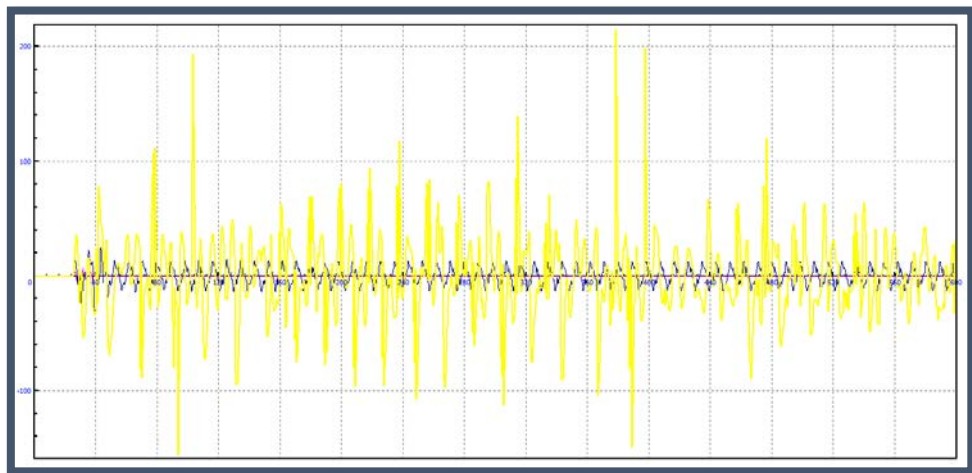


Figura 5.38: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 6.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.39, Figura 5.40 y Figura 5.41 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 45 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

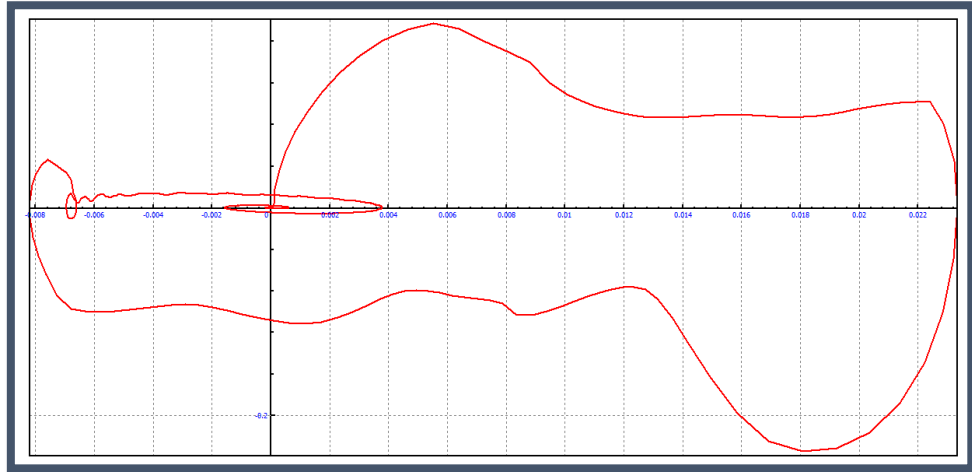


Figura 5.39: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 6.

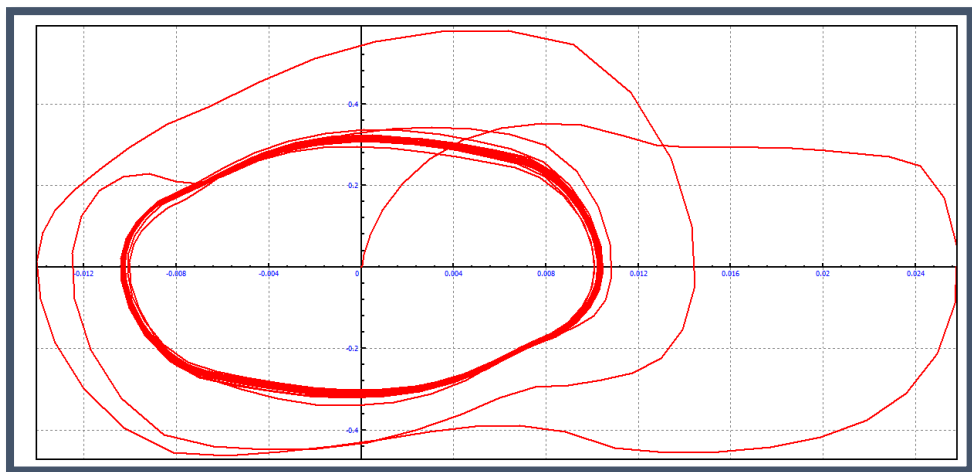


Figura 5.40: Plano de Fase a Velocidad Crítica (45 m/s) del Ensayo 6.

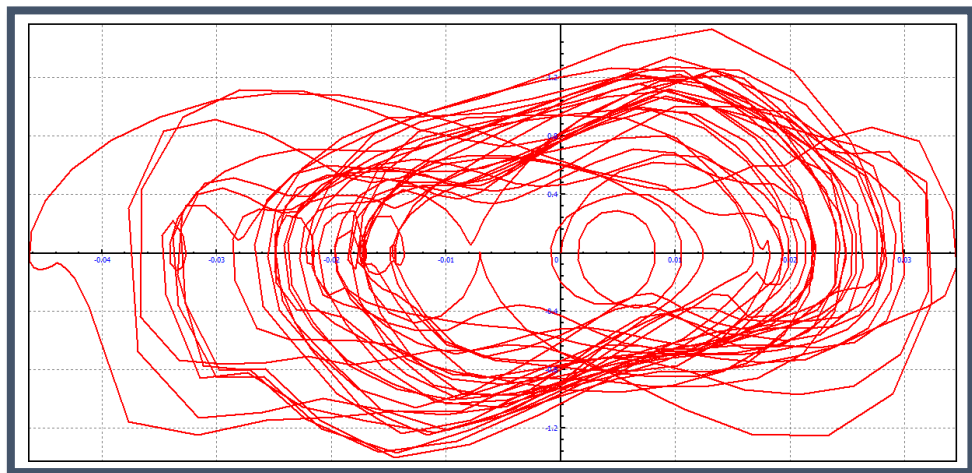


Figura 5.41: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 6.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.42 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

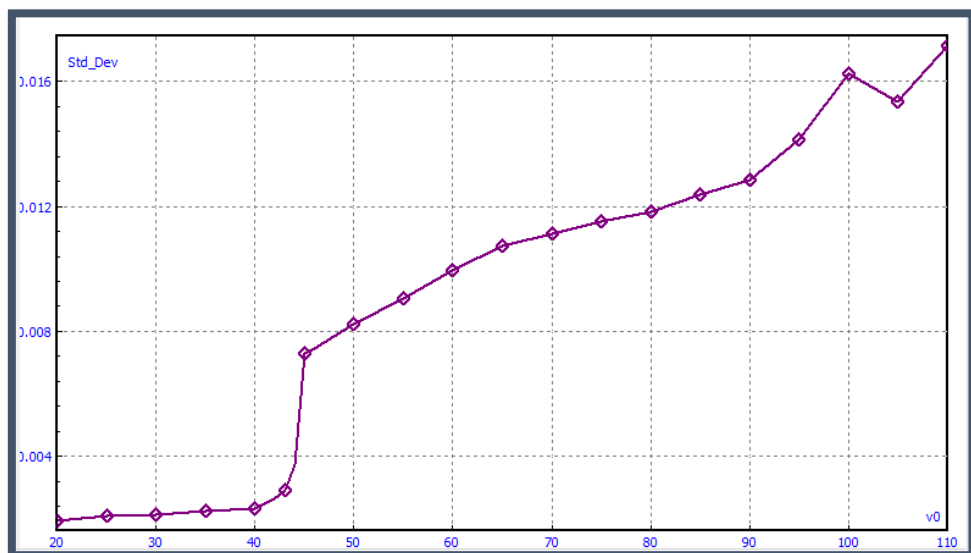


Figura 5.42: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 6.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida para el coche motor cuando este circula con ocupación máxima de pasajeros es de 45 m/s – 162 km/h. Por lo tanto **la velocidad crítica del tren de cercanías de la Serie 446 de RENFE cuando circula a carga máxima es de 44 m/s**, ya que esta es la menor velocidad a la que se desestabilizará uno de los coches (el coche remolque). Queda demostrado por lo tanto que cuanto mayor sea la ocupación de pasajeros en el tren, mayor será la velocidad a la que este comience a desestabilizarse lateralmente. El plano de fase del movimiento de lazo obtenido se puede observar en la Figura 5.40. Dicho movimiento presenta una variación sinusoidal de las variables de posición, velocidad y aceleración laterales con unos valores de amplitud máximos de 0,01 m, 0,35 m/s y 15 m/s².

Cabe destacar que para las velocidades ensayadas no se va a producir el descarrilamiento del tren en ningún caso. En la Figura 5.42 se puede observar que las amplitudes máximas del desplazamiento lateral aumentan de manera lineal con la velocidad del vehículo una vez superada la velocidad crítica (45 m/s). Se repite el ensayo hasta velocidades de 130 m/s y se obtiene que esta curva sigue creciendo y que el tren descarrila para todas las velocidades de circulación a partir de 120 m/s, es decir, 432 km/h.

**5.7. SÉPTIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A
MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES
TRABAJANDO AL 70%.**

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 43 m/s – 154,8 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.43 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

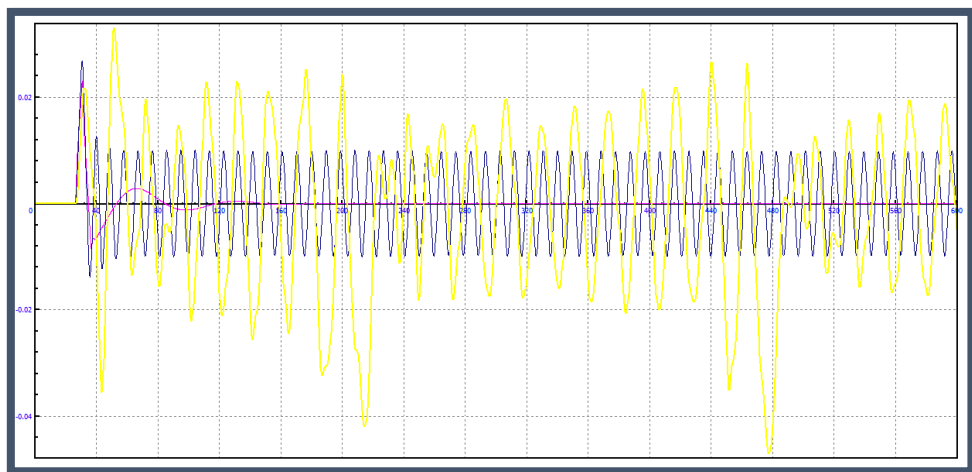


Figura 5.43: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 7.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.44 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

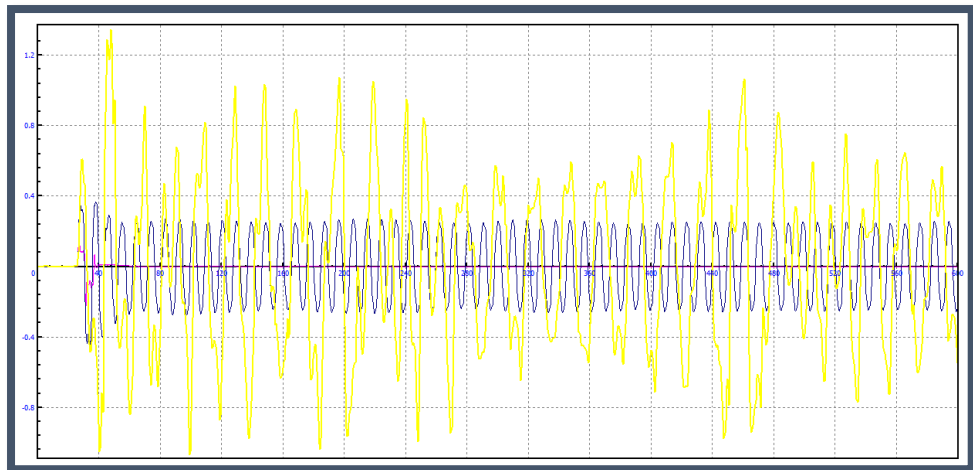


Figura 5.44: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 7.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.45 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

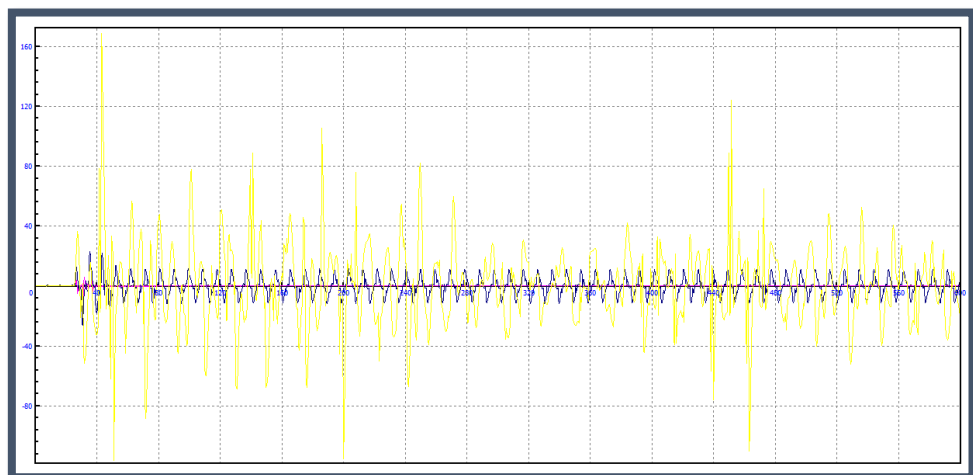


Figura 5.45: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 7.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.46, Figura 5.47 y Figura 5.48 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 43 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

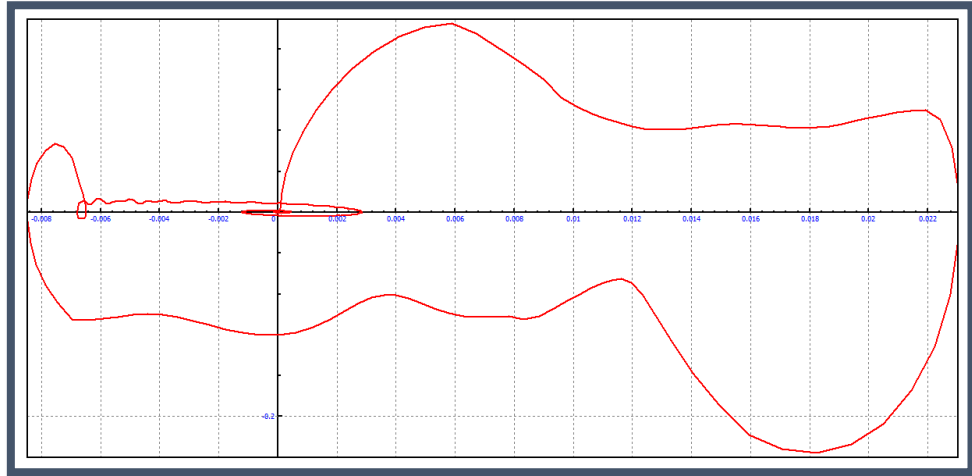


Figura 5.46: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 7.

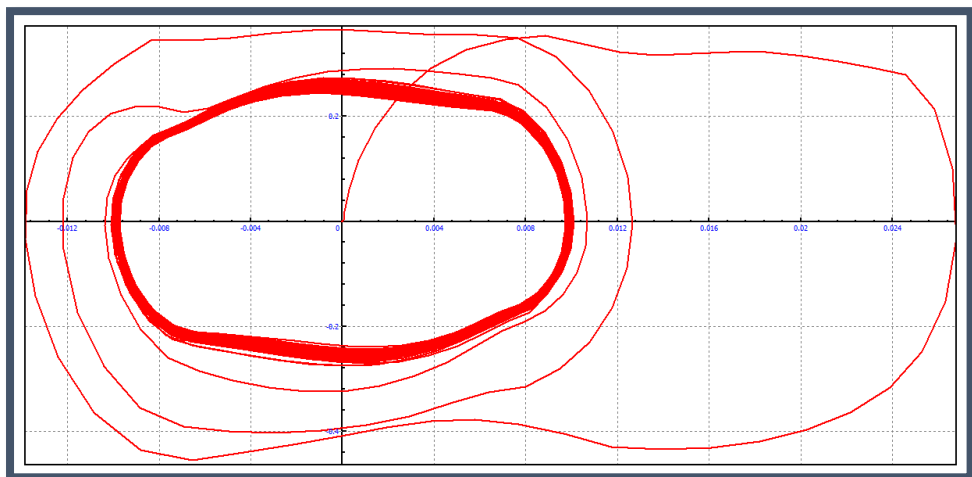


Figura 5.47: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 7.

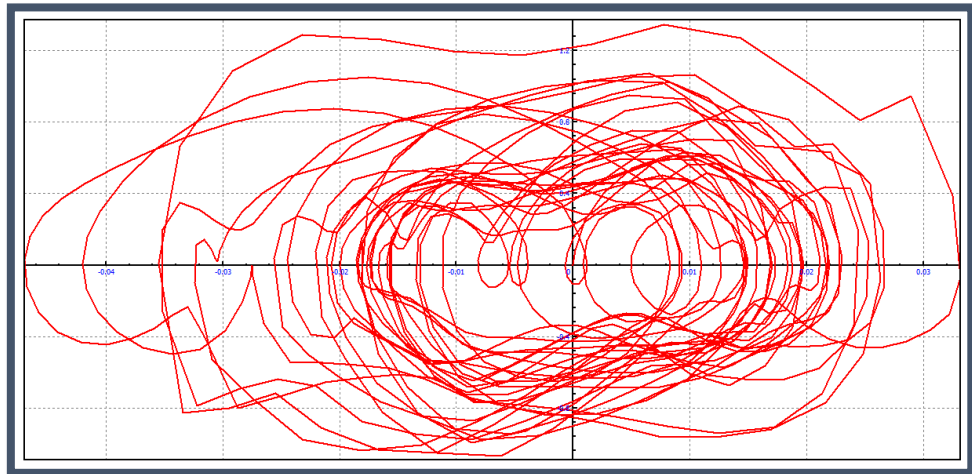


Figura 5.48: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 7.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.49 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

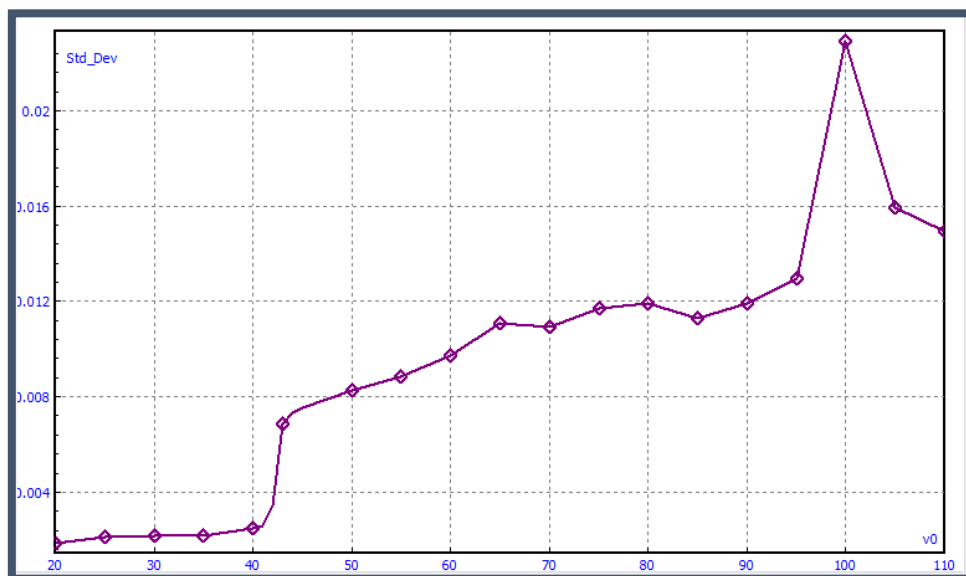


Figura 5.49: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 7.

- **COMENTARIO:**

En este ensayo se va a ver cómo afecta el modificar los amortiguadores de la suspensión primaria para que trabajen con un coeficiente de amortiguación del 70% del valor original. **La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los amortiguadores trabajando al 70% es de 43 m/s – 154,8 km/h.** Este valor es el mismo que el obtenido en el ensayo 3, que es el mismo caso pero con los amortiguadores trabajando bajo las condiciones originales. No se encuentran muchas diferencias entre ambos casos, ya que los amortiguadores de la suspensión primaria están colocados de tal forma que disipan mayor energía en las direcciones vertical y longitudinal del vehículo que en la lateral, que es la dirección en la que se está realizando este estudio.

Entre las grandes variaciones en los resultados obtenidos para este caso se encuentra que el movimiento caótico producido cuando el tren circula a 110 m/s es todavía más irregular e impredecible, como se muestra en el plano de fase de la Figura 5.48.

Cabe destacar también que en este ensayo solo se producirá el descarrilamiento del tren cuando este viaja a 100 m/s y, sin embargo, cuando los amortiguadores trabajaban al 100% en el ensayo 3 este suceso también se producía a 105 m/s.

En cuanto al movimiento de lazo que se produce a velocidad crítica, los valores obtenidos para las amplitudes máximas de posición, velocidad y aceleración laterales son exactamente iguales a los calculados en el ensayo 3. Por tanto, podemos concluir que los amortiguadores de la suspensión primaria del bogie del tren de la Serie 446 no afectan en gran medida a la estabilidad lateral del vehículo.

**5.8. OCTAVO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A
MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES
TRABAJANDO AL 80%.**

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 43 m/s – 154,8 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.50 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

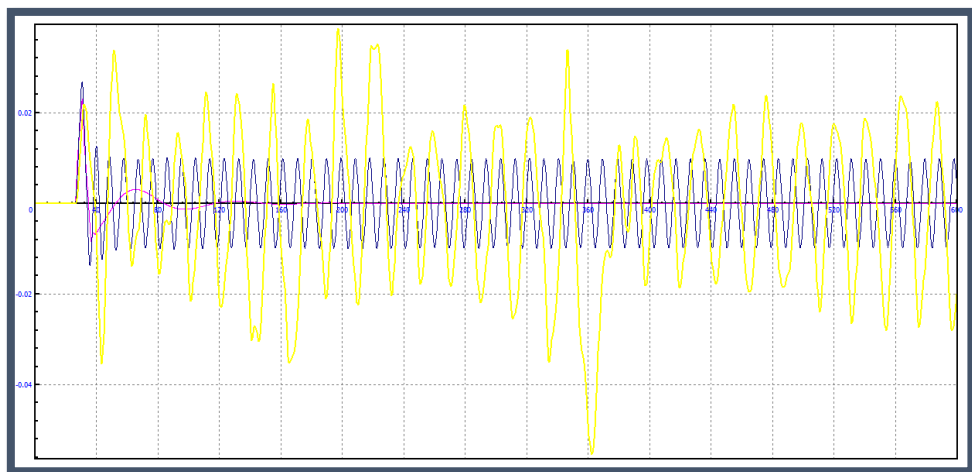


Figura 5.50: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 8.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.51 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

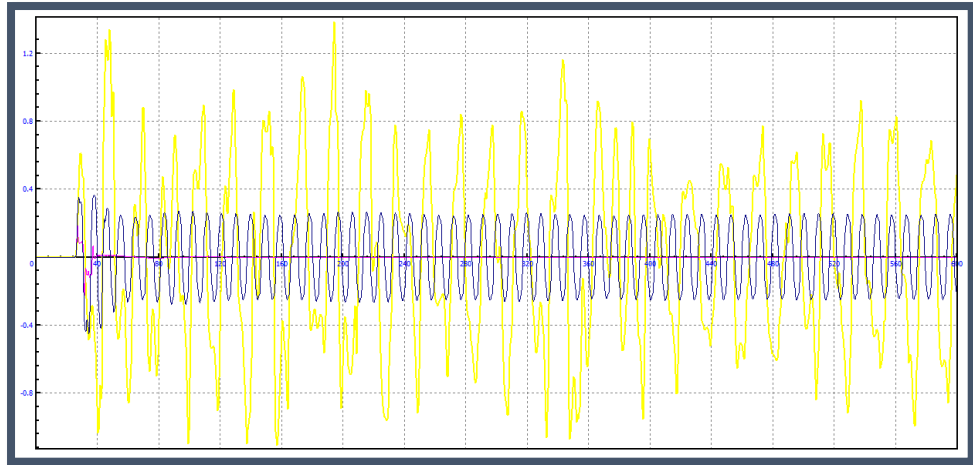


Figura 5.51: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 8.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.52 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

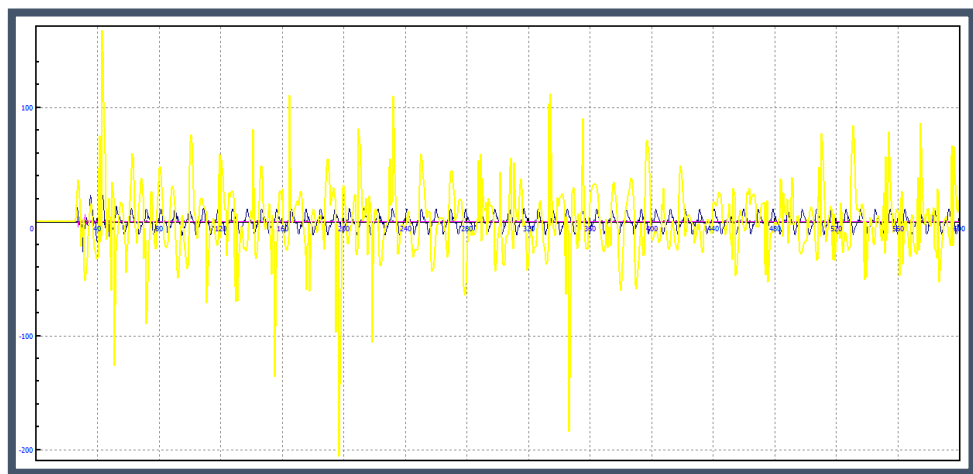


Figura 5.52: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 8.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.53, Figura 5.54 y Figura 5.55 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 43 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

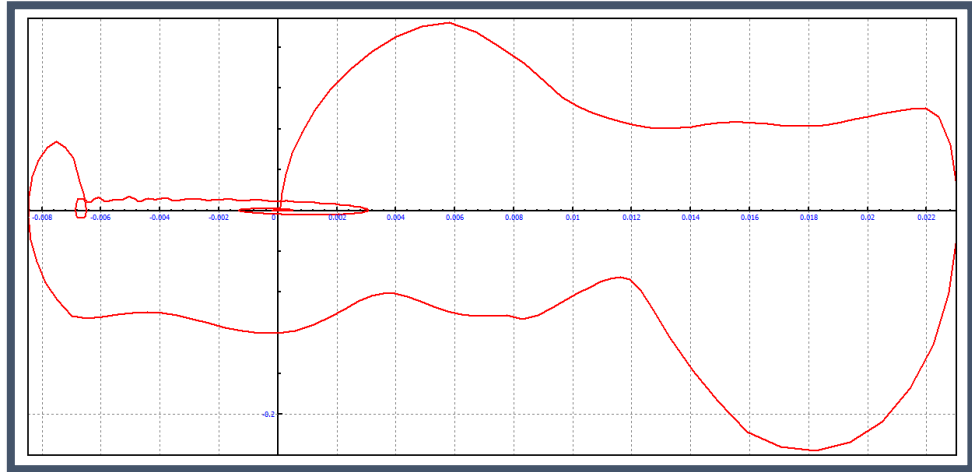


Figura 5.53: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 8.

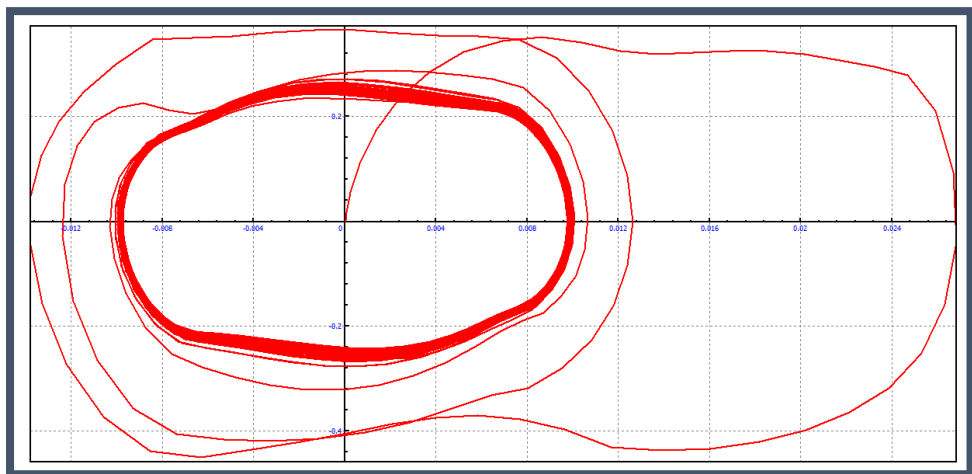


Figura 5.54: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 8.

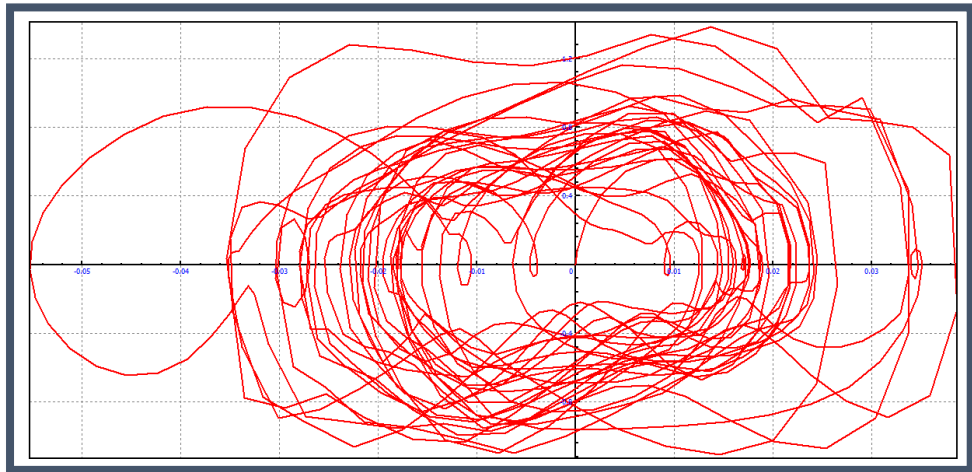


Figura 5.55: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 8.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.56 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

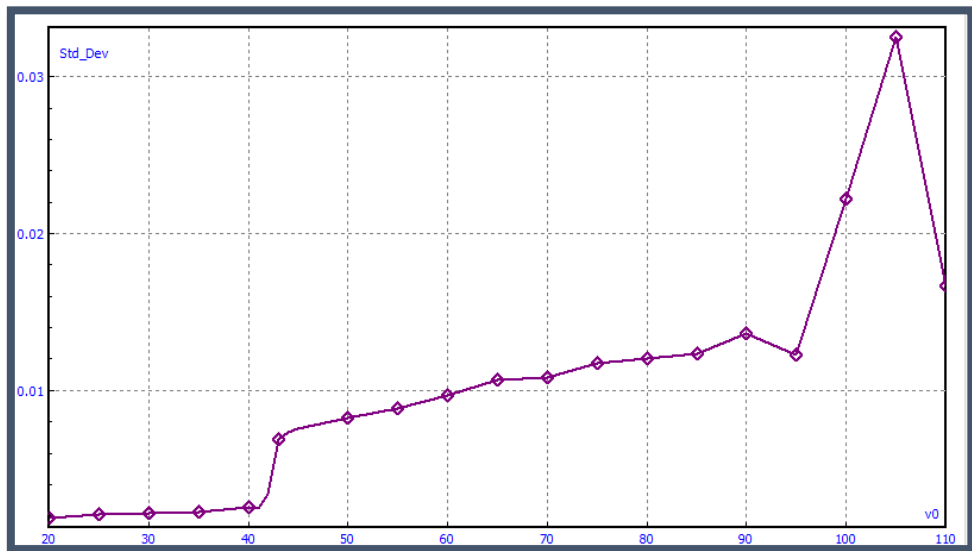


Figura 5.56: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 8.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los amortiguadores trabajando al 80% es de 43 m/s – 154,8 km/h.

Este dato de velocidad crítica es similar al obtenido cuando los amortiguadores trabajan al 70% y al 100%. El movimiento de lazo que se produce en el tren a dicha velocidad de desplazamiento será prácticamente exacto en cuanto a frecuencia y amplitud que en dichos casos.

En cuanto al descarrilamiento del vehículo sí que se obtienen resultados diferentes al ensayo anterior, ya que además de a 100 m/s también se va a producir el extravío del tren a 105 m/s. Esto se puede observar en los altos valores de la amplitud máxima de posición lateral del eje observables en la Figura 5.56.

Además, cuando el vehículo circula a 110 m/s está a punto de suceder el descarrilamiento, llegándose a un desplazamiento lateral de 60 milímetros por la izquierda, 10 milímetros más que en el ensayo con los amortiguadores trabajando al 70%. Este brusco y casi catastrófico movimiento lateral se puede observar en la parte izquierda del plano de fase de la Figura 5.55. Finalmente el tren consigue no descarrilar remontando a posiciones laterales más céntricas.

**5.9. NOVENO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A
MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES
TRABAJANDO AL 90%.**

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 43 m/s – 154,8 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.57 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

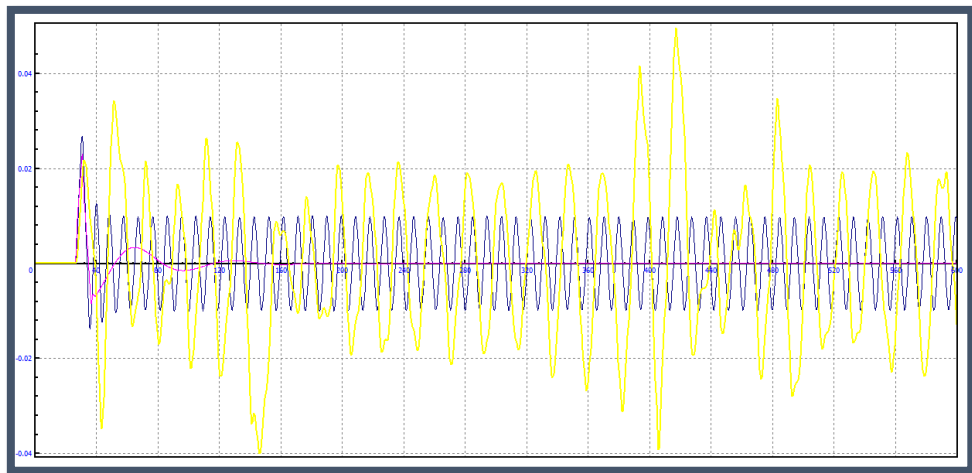


Figura 5.57: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 9.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.58 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

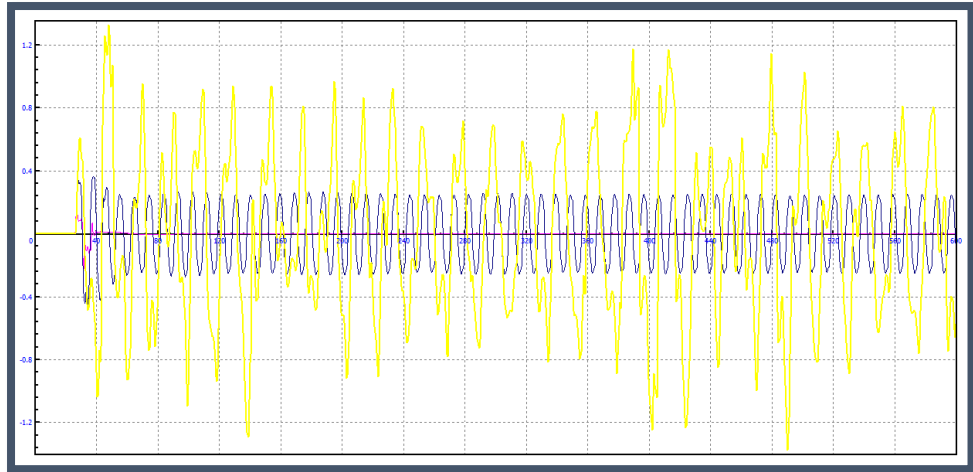


Figura 5.58: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 9.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.59 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

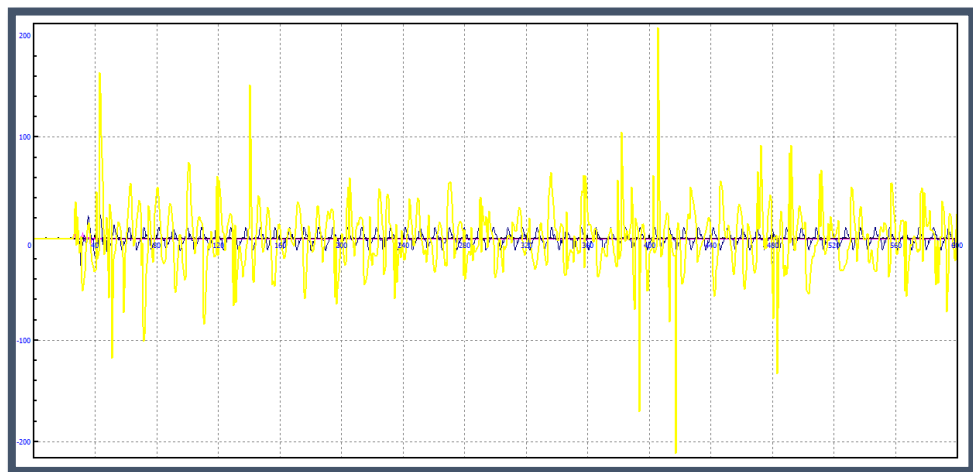


Figura 5.59: aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 9.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.60, Figura 5.61 y Figura 5.62 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 43 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

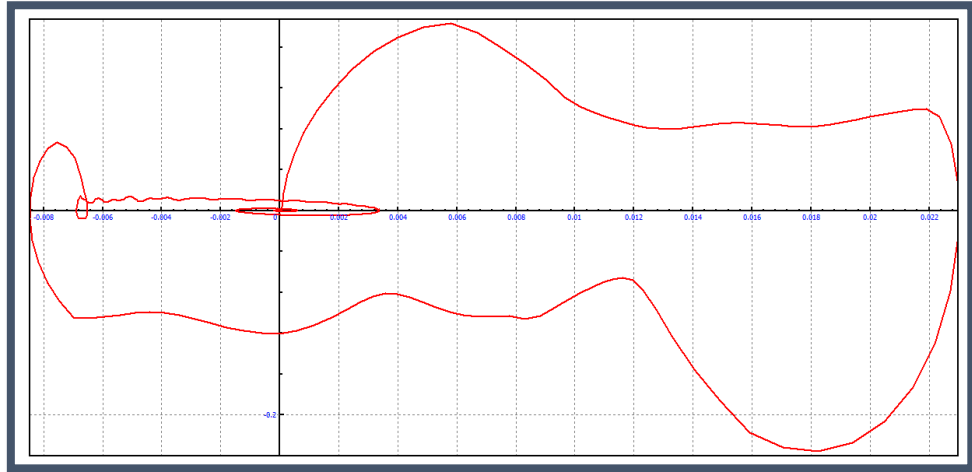


Figura 5.60: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 9.

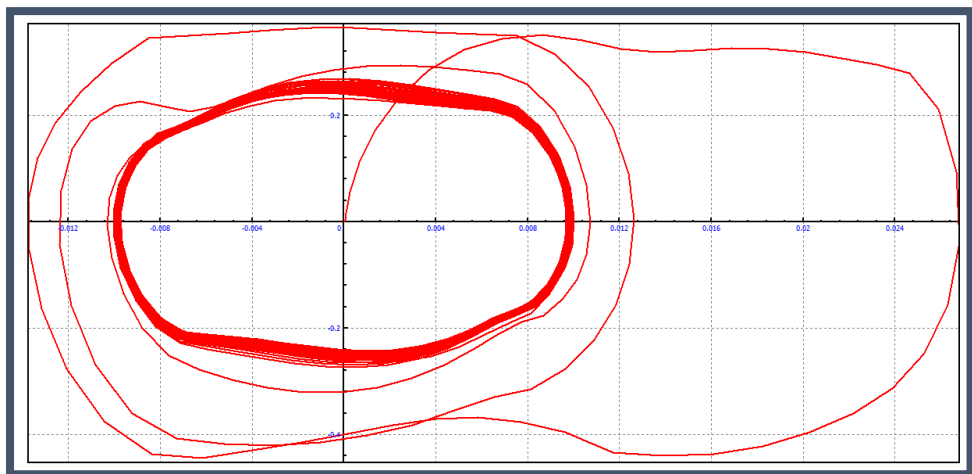


Figura 5.61: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 9.

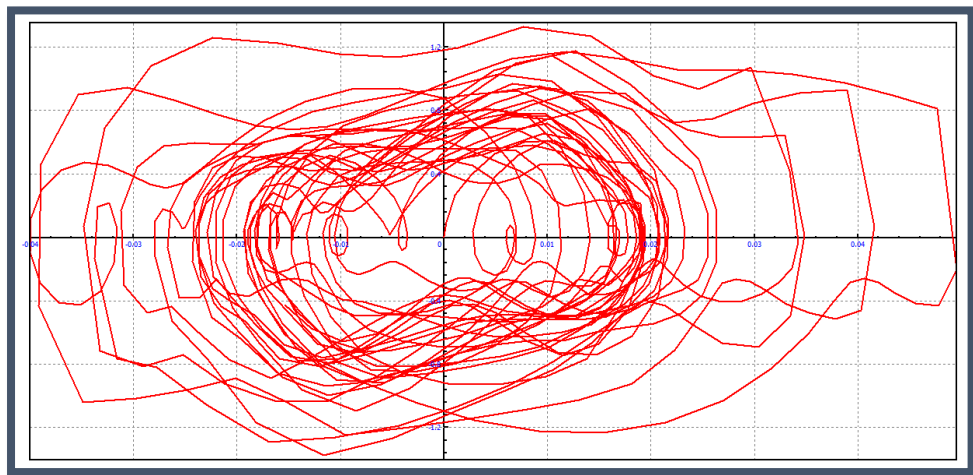


Figura 5.62: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 9.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.63 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

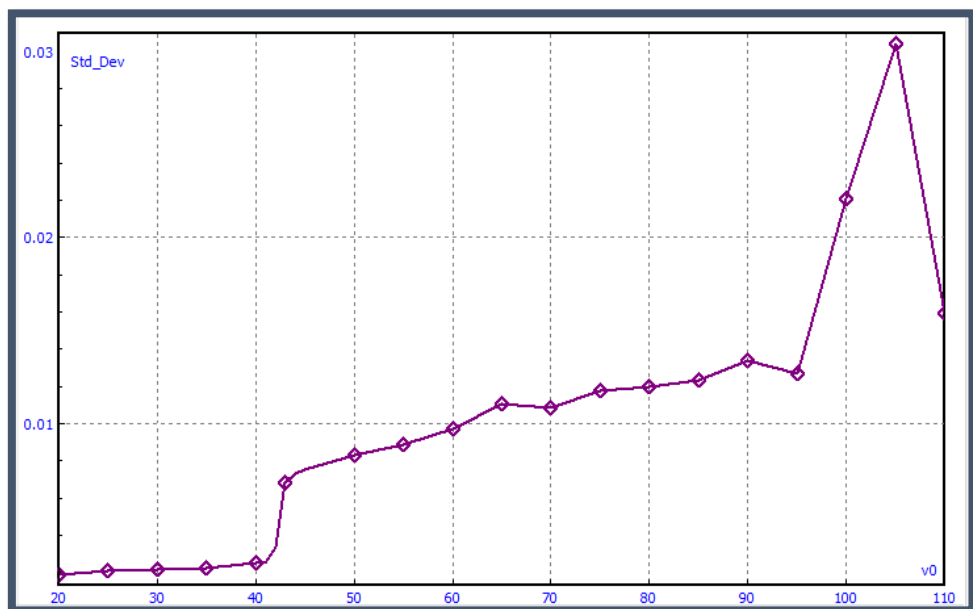


Figura 5.63: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 9.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los amortiguadores trabajando al 90% es de 43 m/s – 154,8 km/h.

Esta velocidad no ha variado con respecto a los otros ensayos realizados para el coche remolque del tren de la Serie 446 cuando se desplaza a media carga de pasajeros. El movimiento de lazo que se crea a dicha velocidad sigue unos parámetros similares a dichos ensayos.

Los resultados en cuanto a descarrilamientos son iguales a los del caso anterior (amortiguación al 80%), en el cual el tren se sale de las vías en las simulaciones de 100 y 105 m/s de velocidad. De hecho, si se observan las gráficas que relacionan la amplitud de desplazamiento lateral máximo con la velocidad del ferrocarril de ambos casos se ve como estos valores son prácticamente exactos (Figura 5.56 y Figura 5.63).

A 110 m/s el tren también está a punto de salirse de las vías, con un desplazamiento lateral máximo de 60 milímetros. Pero en este caso, al contrario que en el ensayo anterior, el tren casi descarrila hacia la derecha de la vía.

**5.10. DÉCIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE A
MEDIA CARGA CON AMORTIGUADORES
TRABAJANDO AL 130%.**

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 44 m/s – 158,4 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.64 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

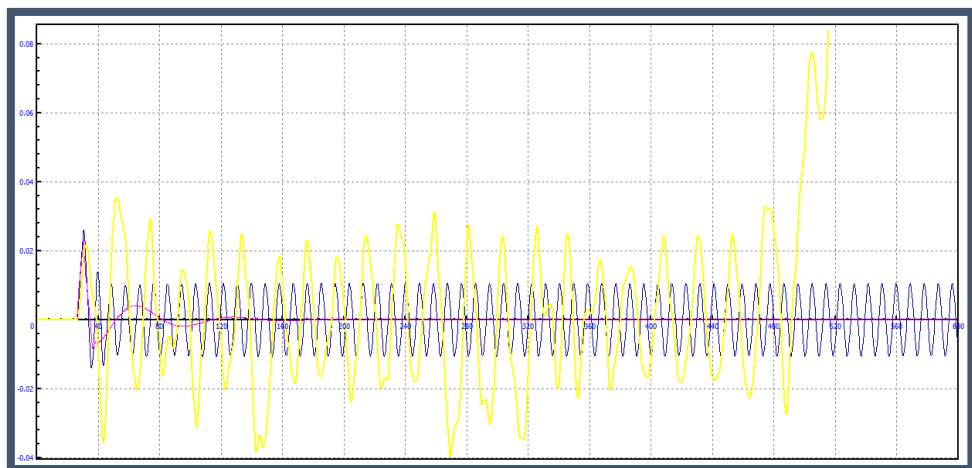


Figura 5.64: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 10.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.65 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

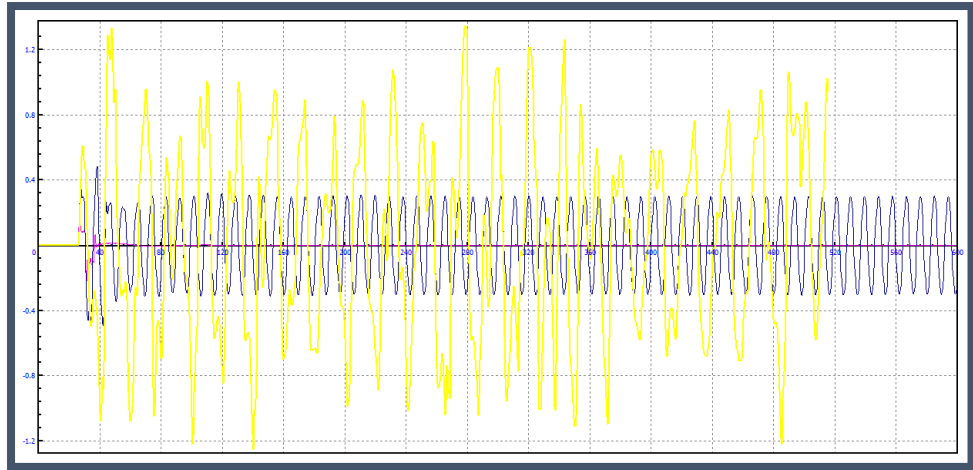


Figura 5.65: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 10.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.66 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

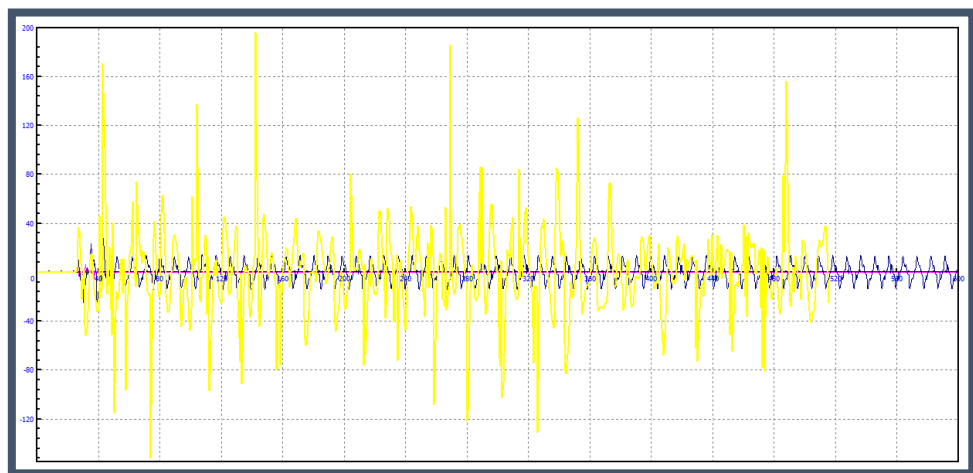


Figura 5.66: aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 10.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.67, Figura 5.68 y Figura 5.69 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 44 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

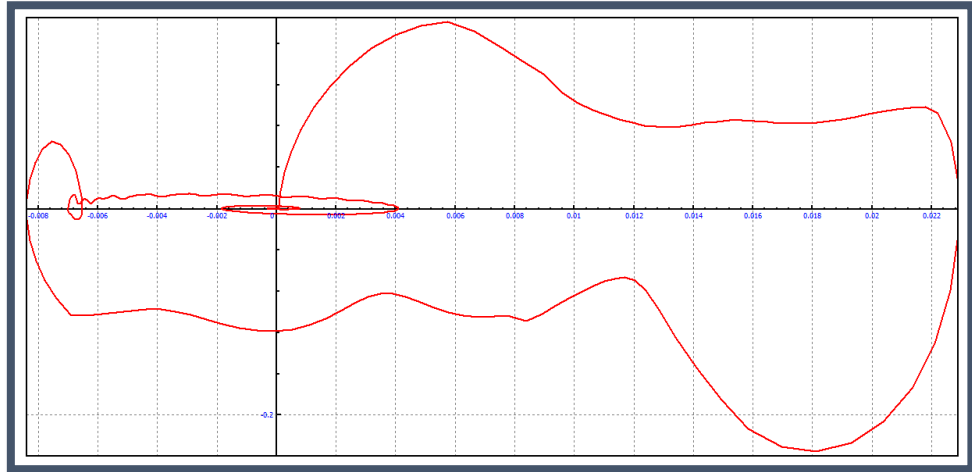


Figura 5.67: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 10.

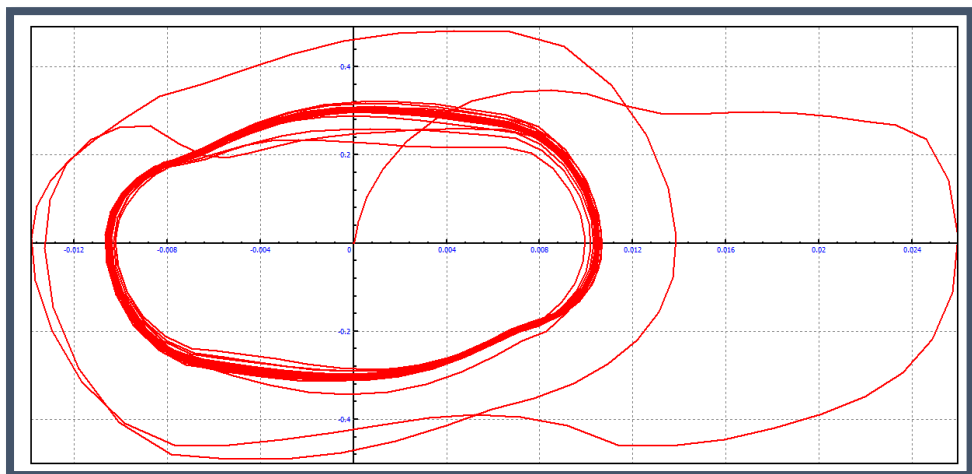


Figura 5.68: Plano de Fase a Velocidad Crítica (44 m/s) del Ensayo 10.

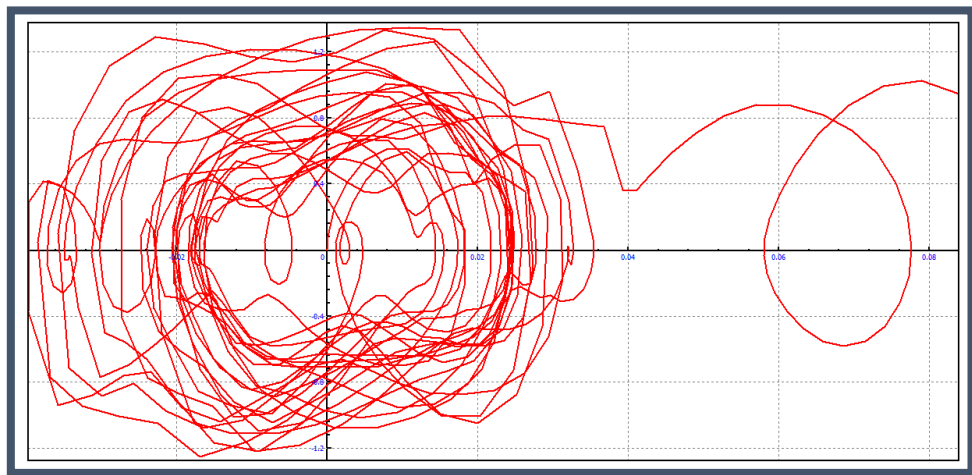


Figura 5.69: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 10.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.70 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

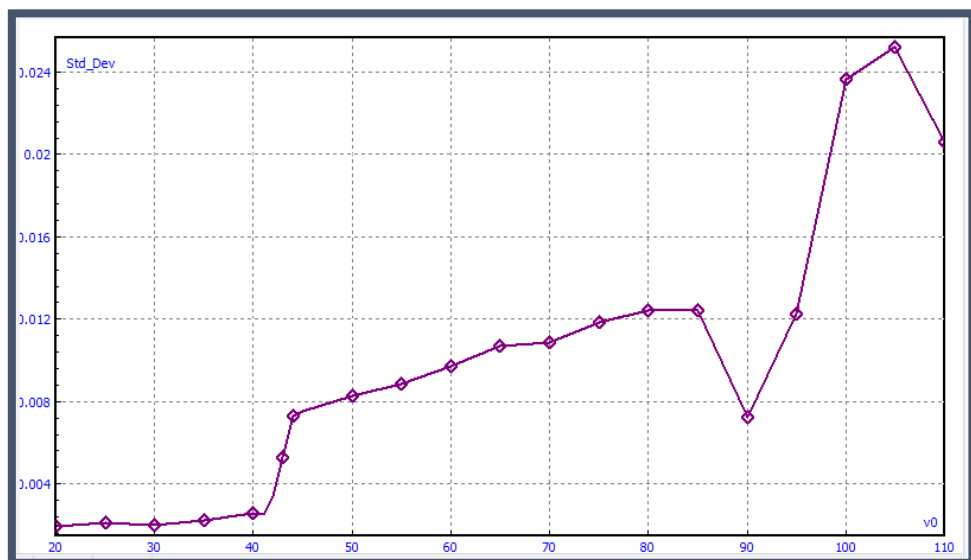


Figura 5.70: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 10.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los amortiguadores trabajando al 130% es de 44 m/s – 158,4 km/h.

Esta es mayor que el de las velocidades críticas averiguadas para cuando los amortiguadores trabajan con menor coeficiente de amortiguación en los casos anteriores. Esto quiere decir que un crecimiento de dicho coeficiente afectará de manera positiva a la estabilidad del vehículo, haciendo posible el desplazamiento del tren a una velocidad algo superior. El movimiento de lazo que efectuará el tren si se llega a dicha velocidad seguirá un ciclo límite estable de parámetros similares a los de los casos anteriores. La relación entre posición y velocidad laterales de este ciclo límite puede observarse en la Figura 5.68.

Cabe destacar que además de a 100 y 105 m/s, el tren también descarrilará a 110 m/s. En color amarillo en la Figura 5.64 se puede ver como transcurridos por el tren 520 metros se va a producir este descarrilamiento. En el plano de fase de la Figura 5.69 se muestra como, tras seguir un comportamiento totalmente caótico, la curva se sale de la gráfica por la derecha representando la salida de vía del tren.

5.11. UNDÉCIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE CON RESORTES TRABAJANDO AL 70%.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 42 m/s – 151,2 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.71 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 42 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

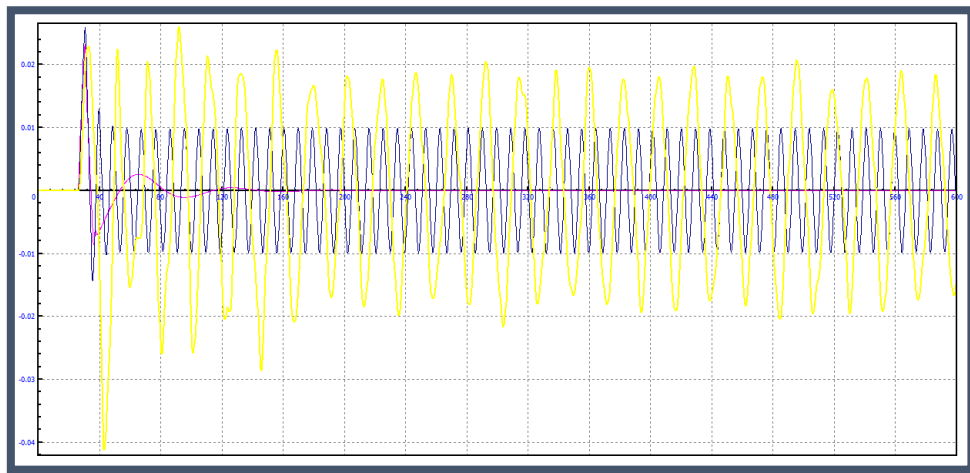


Figura 5.71: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 11.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.72 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 42 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

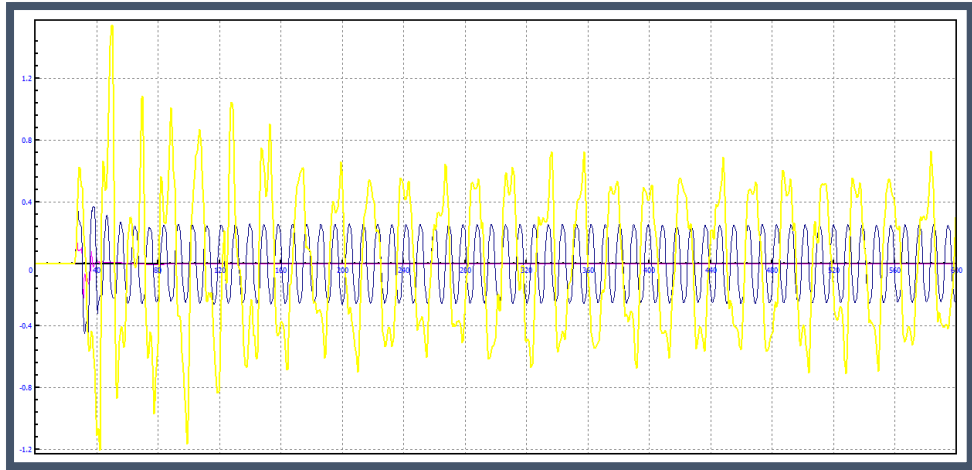


Figura 5.72: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 11.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.73 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 42 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

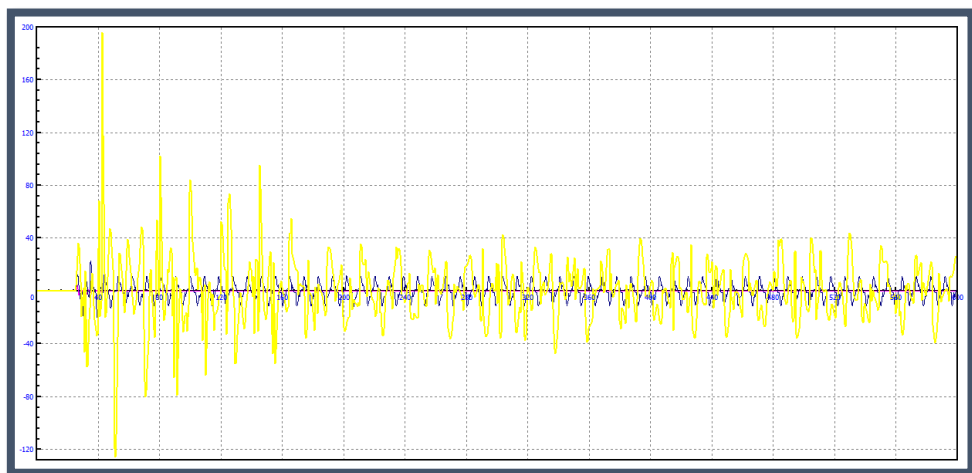


Figura 5.73: aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 11.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.74, Figura 5.75 y Figura 5.76 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 42 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

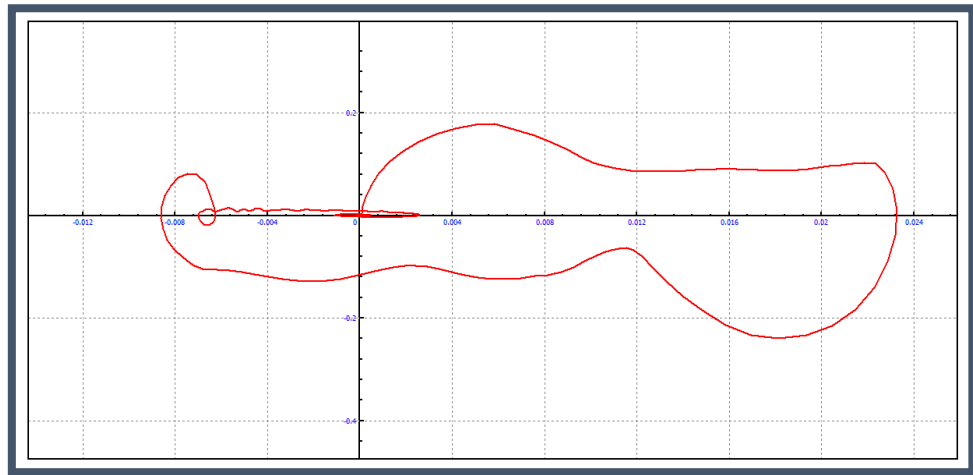


Figura 5.74: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 11.

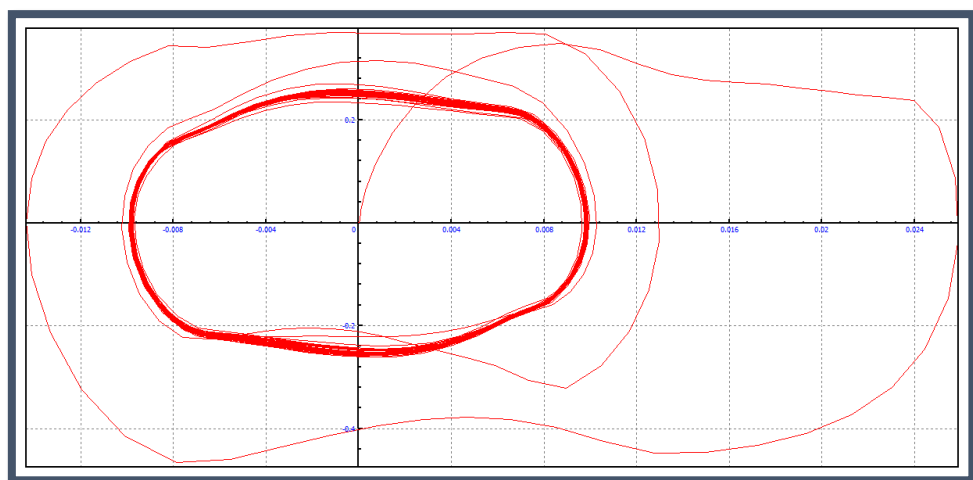


Figura 5.75: Plano de Fase a Velocidad Crítica (42 m/s) del Ensayo 11.

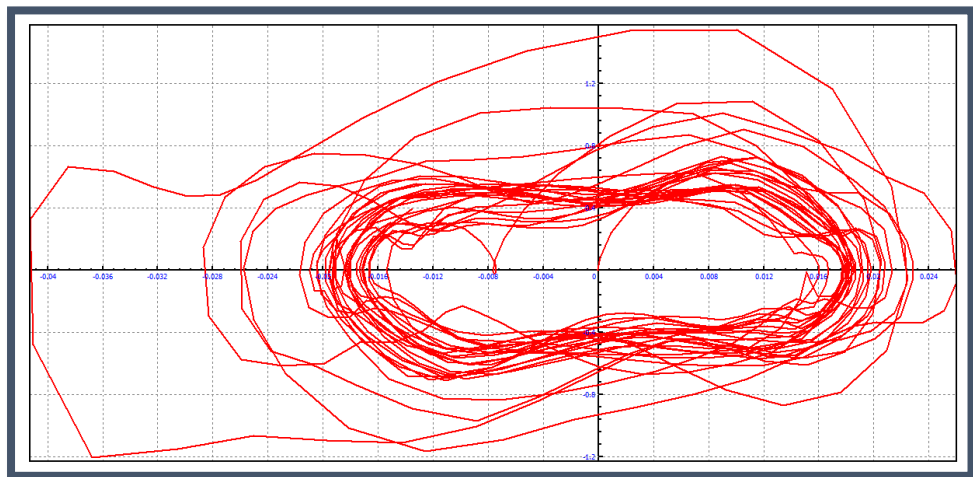


Figura 5.76: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 11.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.77 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

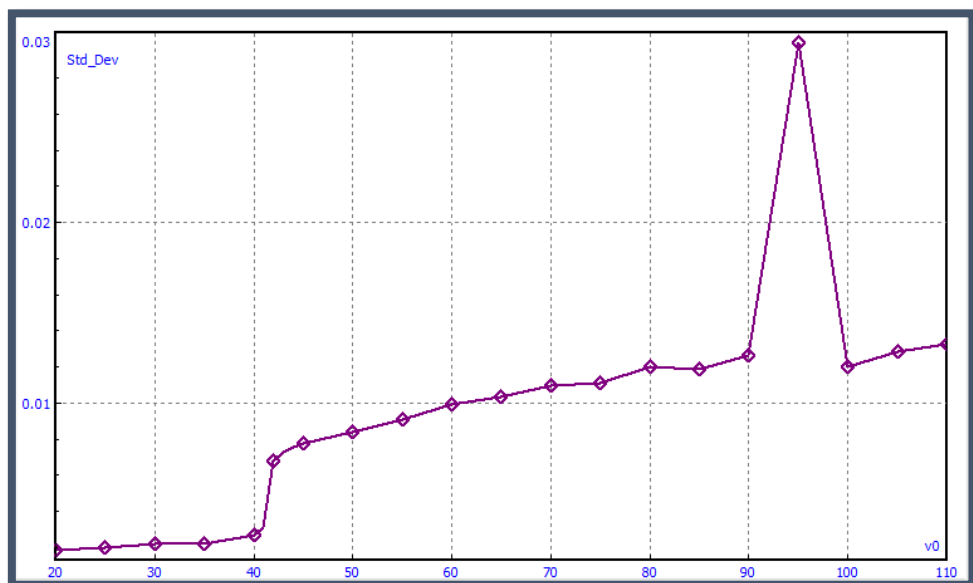


Figura 5.77: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 11.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los resortes helicoidales trabajando al 70% es de 42 m/s – 151,2 km/h. Este valor es menor que el obtenido para el ensayo en el que los muelles de la suspensión primaria tienen el valor original de rigidez y, por lo tanto, el tren se desestabilizará a menor velocidad de circulación en este caso.

Además se ha averiguado que bajo estas condiciones el tren descarrilará antes, a 95 m/s. Estos son 5 m/s menos que la velocidad para la cual el coche se salía de la vía en condiciones normales de suspensión. Sin embargo a 100 m/s el vehículo ya no descarrilará. En la Figura 5.77 se puede ver un pico en el desplazamiento lateral máximo del eje a 95 m/s, lo cual representa dicha salida de los carriles.

Se puede concluir entonces que la bajada de la rigidez que define los resortes helicoidales de la suspensión primaria a un valor del 70% hace que empeore la estabilidad lateral del vehículo, ya que, tanto la velocidad a la cual comienza el movimiento de lazo, como la velocidad a la cual el coche remolque descarrila, descienden.

5.12. DUODÉCIMO ENSAYO: COCHE REMOLQUE **CON RESORTES TRABAJANDO AL 80%.**

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 42 m/s – 151,2 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.78 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 42 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

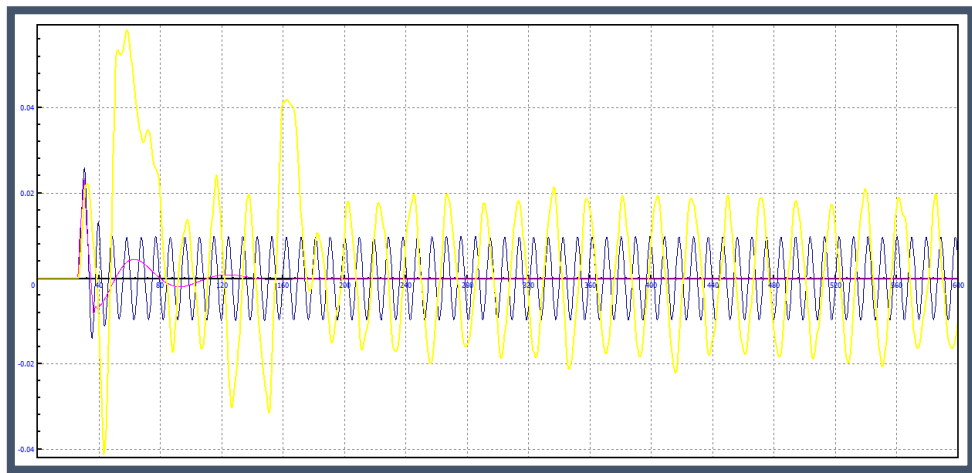


Figura 5.78: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 12.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.79 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 42 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

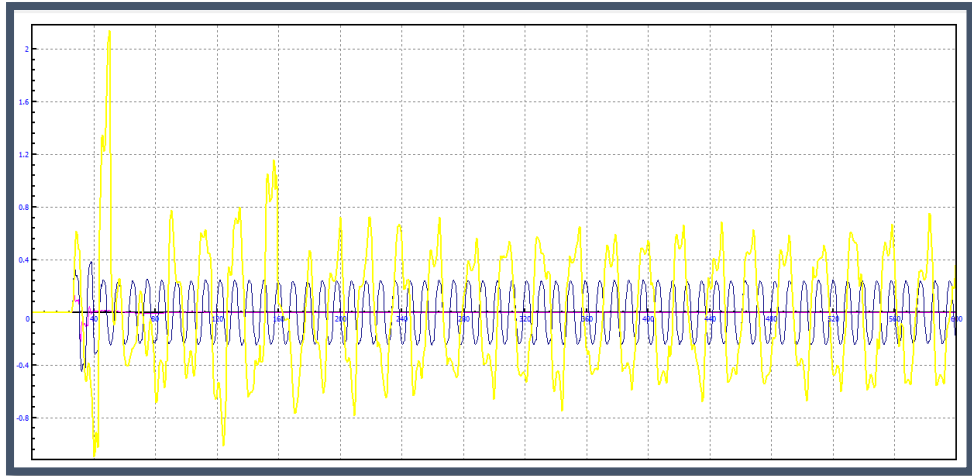


Figura 5.79: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 12.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.80 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 42 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

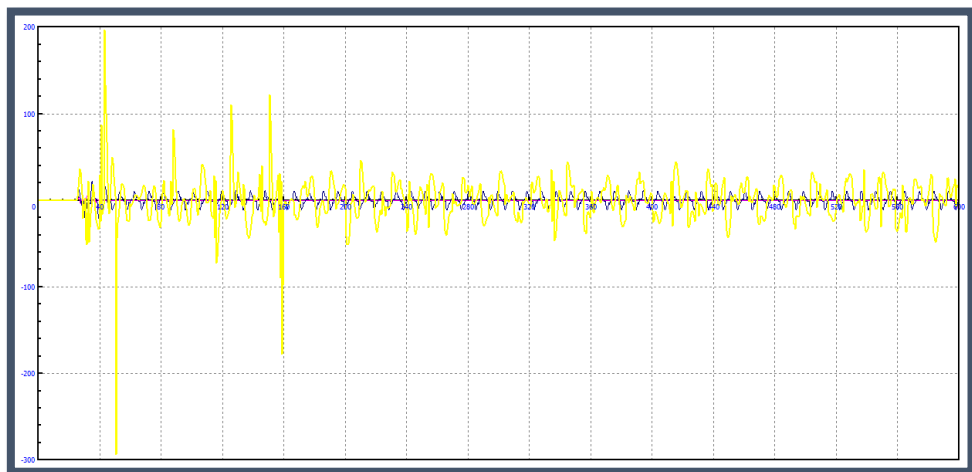


Figura 5.80: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 12.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.81, Figura 5.82 y Figura 5.83 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 42 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

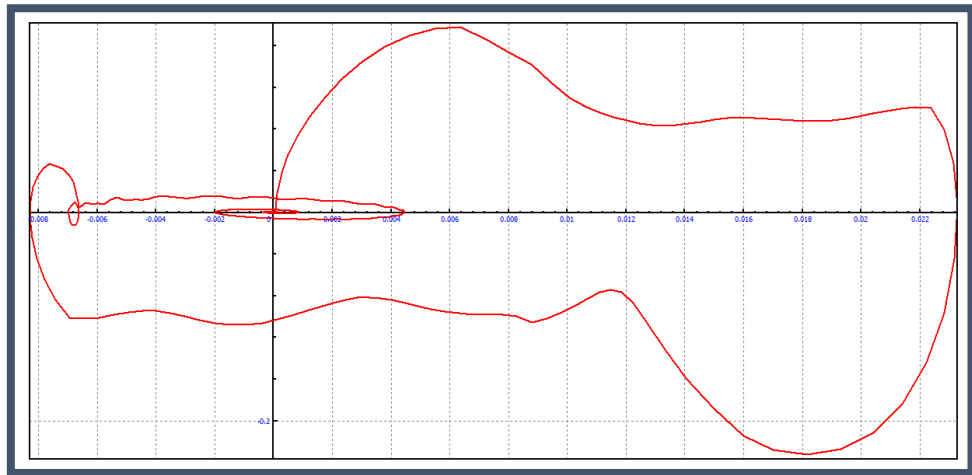


Figura 5.81: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 12.

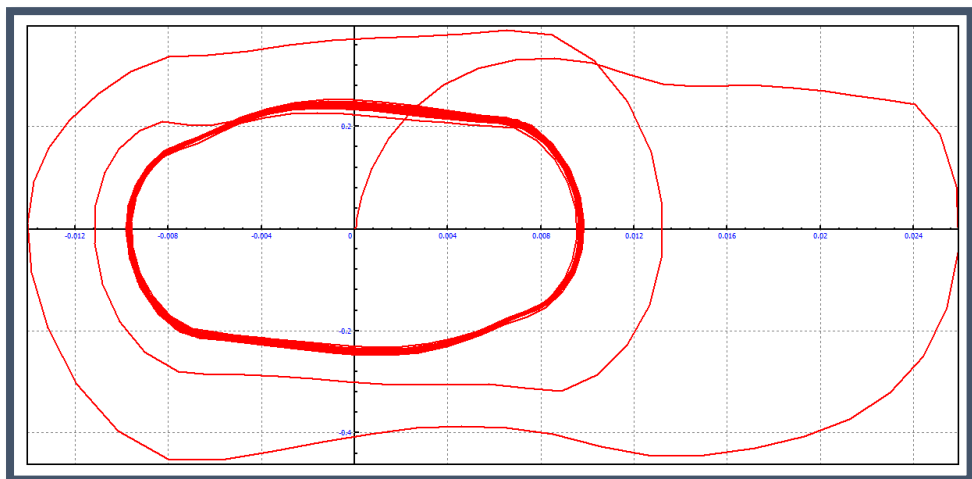


Figura 5.82: Plano de Fase a Velocidad Crítica (42 m/s) del Ensayo 12.

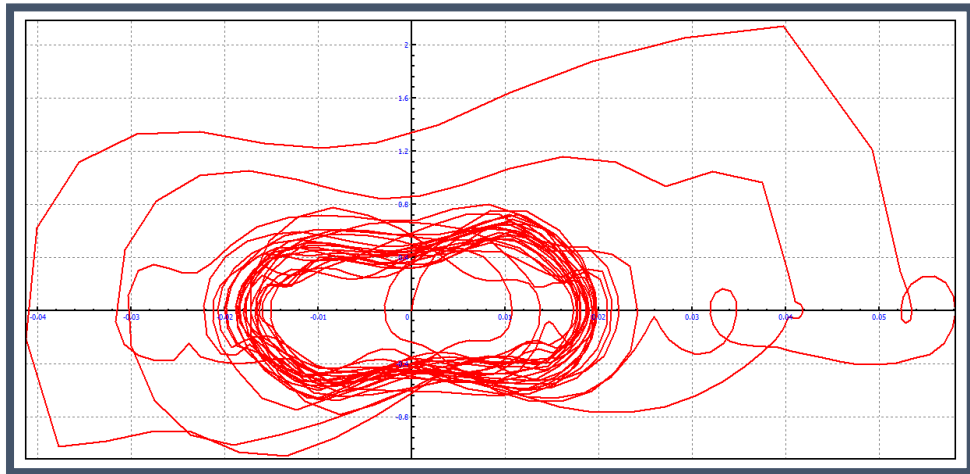


Figura 5.83: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 12.

- CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.84 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

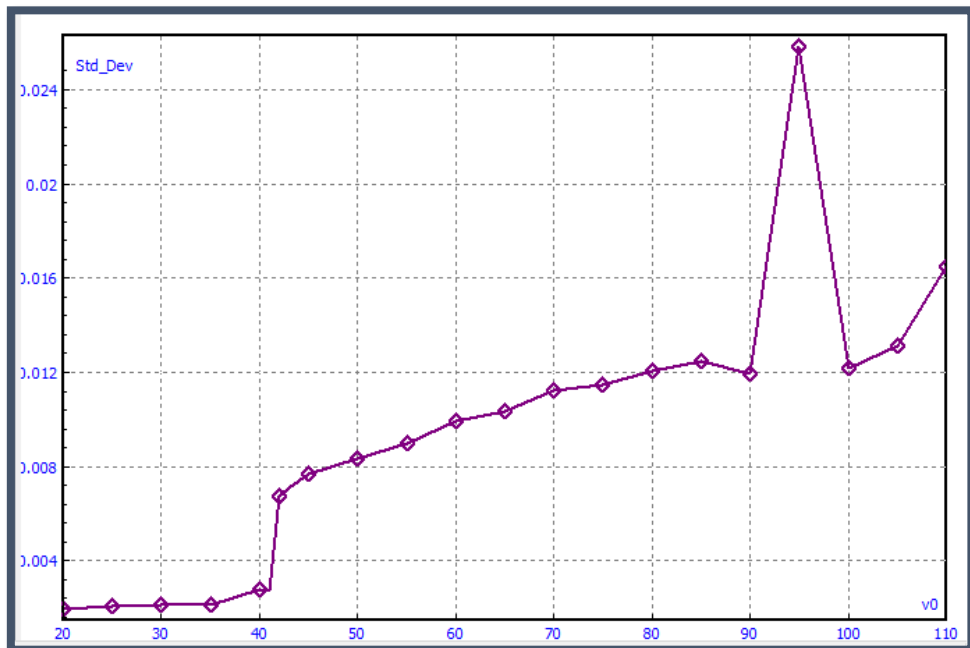


Figura 5.84: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 12.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los resortes helicoidales trabajando al 80% es de 42 m/s – 151,2 km/h. Este valor es similar al obtenido cuando los muelles presentan un valor del 70% de la constante de rigidez original, ensayo anterior. Además, el movimiento de lazo a dicha velocidad presenta unas amplitudes máximas de posición, velocidad y aceleración laterales muy similares a dicho ensayo.

De nuevo el tren vuelve a descarrilar a 95 m/s, pero a partir de dicha velocidad y, como puede observarse en la desviación típica de la amplitud de movimiento lateral presentada en la Figura 5.84, los movimientos laterales del tren se vuelven mucho menos pronunciados.

En la Figura 5.83 se representa el plano de fase del movimiento lateral del vehículo cuando este circula a 110 m/s. Señalar que este es el ensayo para el que se ha obtenido que a dicha velocidad el movimiento es menos caótico. De hecho, se puede ver en la imagen como en parte del trayecto se seguirá un movimiento de bucle semejante a un ciclo límite. En este caso, y si se puede considerar como ciclo límite, este sería inestable ya que la curva tiende a salirse de la trayectoria cerrada.

5.13. DÉCIMO TERCER ENSAYO: COCHE
REMOLQUE CON RESORTES TRABAJANDO AL
90%.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 43 m/s – 154,8 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.85 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

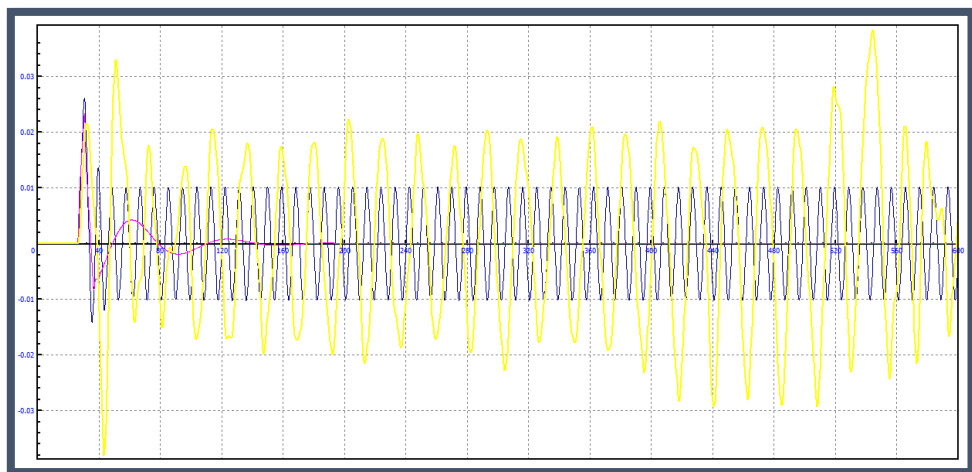


Figura 5.85: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 13.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.86 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

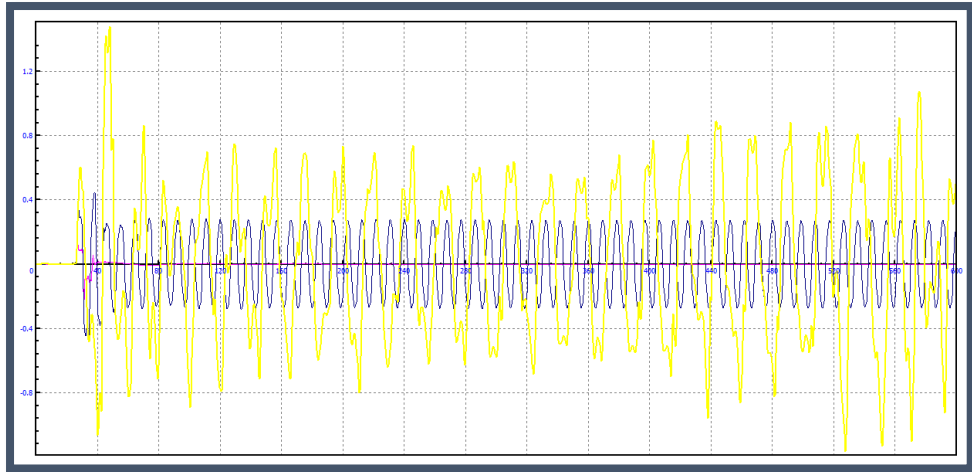


Figura 5.86: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 13.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.87 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 43 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

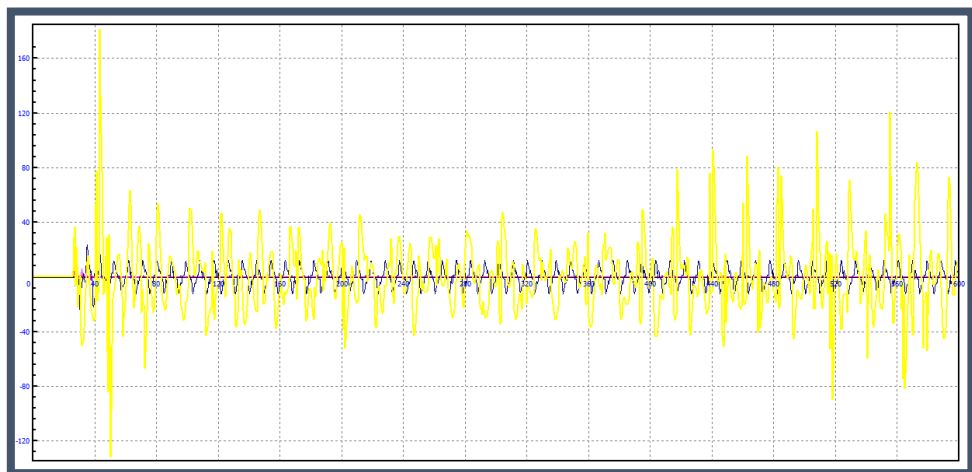


Figura 5.87: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 13.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.88, Figura 5.89 y Figura 5.90 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 43 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

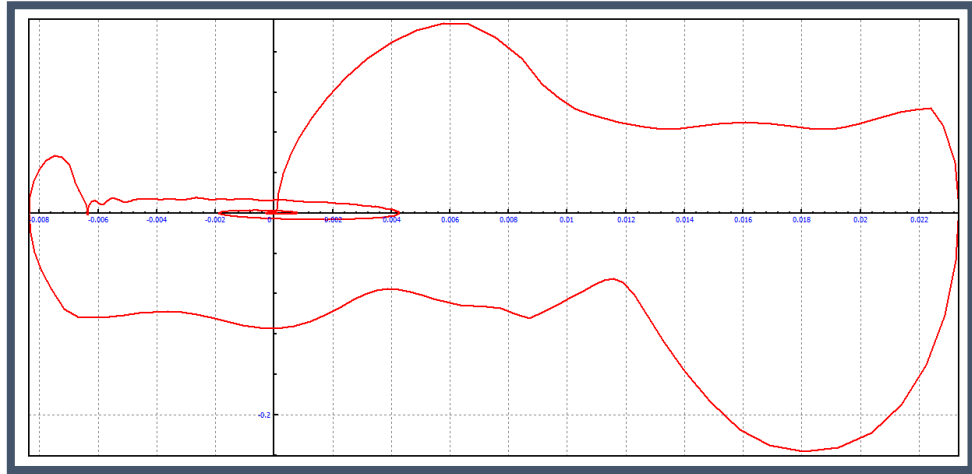


Figura 5.88: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 13.

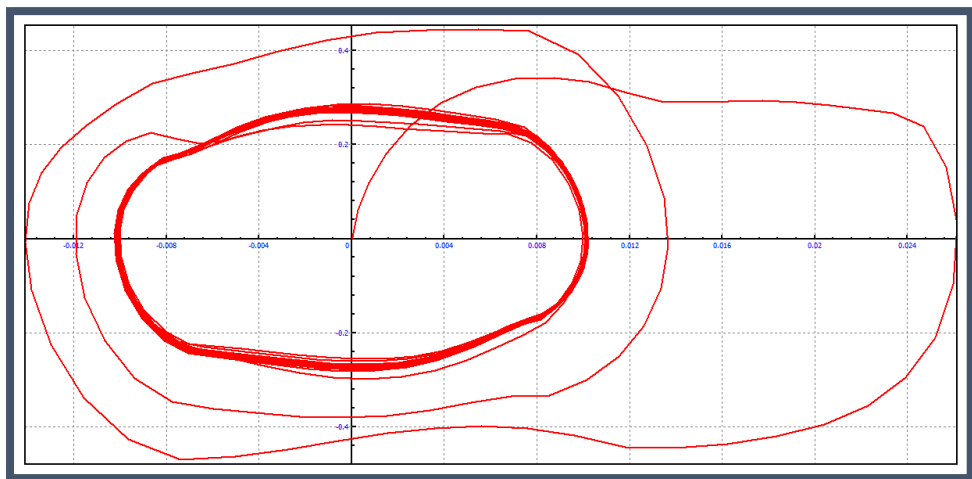


Figura 5.89: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 13.

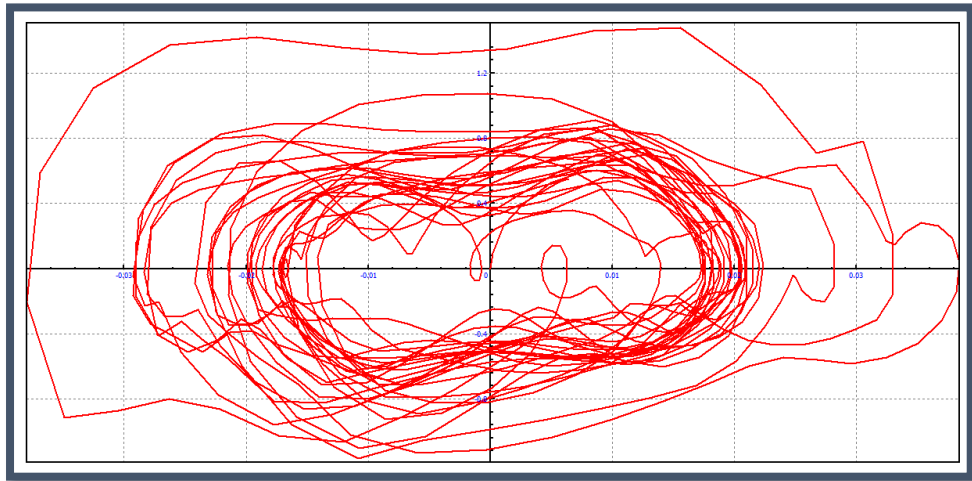


Figura 5.90: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 13.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.91 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

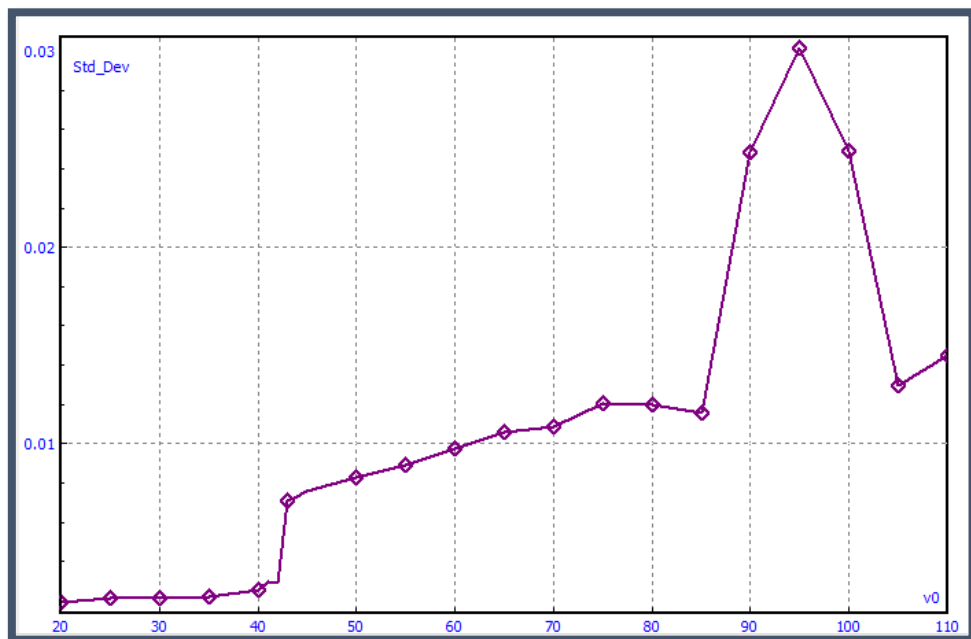


Figura 5.91: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 13.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los resortes helicoidales trabajando al 90% es de 43 m/s – 154,8 km/h. Este valor es el mismo que el obtenido para cuando se colocan en la suspensión primaria los resortes con la rigidez vertical original.

Cabe destacar que en este ensayo el tren descarrila a las velocidades de 90, 95 y 100 m/s. Esto significa que la salida de la vía del vehículo se va a producir a una velocidad de 10 m/s menor que cuando el valor de la rigidez es del 10% más elevada, y 5 m/s menor que el caso en que la rigidez es un 10% más pequeña.

Se puede observar en la Figura 5.91 como los valores de desplazamiento lateral en el eje son mucho más dispersos (desviación típica mayor) cuando se producen los descarrilamientos. Después de pasar la velocidad crítica del vehículo se puede apreciar como la desviación típica aumenta de manera lineal. Esto quiere decir que a medida que se aumenta la velocidad, el movimiento de lazo producido va a presentar unas amplitudes máximas de desplazamiento lateral mayores.

5.14. DÉCIMO CUARTO ENSAYO: COCHE
REMOLOQUE CON RESORTES TRABAJANDO AL
110%.

- **VELOCIDAD CRÍTICA:** 44 m/s – 158,4 km/h.
- **POSICIÓN LATERAL:** En la Figura 5.92 se muestra la posición lateral (m) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

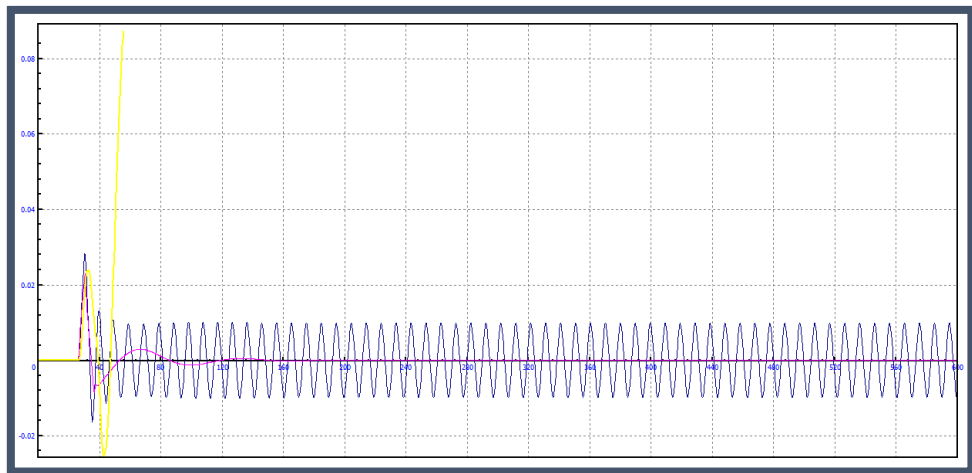


Figura 5.92: Posición Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 14.

- **VELOCIDAD LATERAL:** En la Figura 5.93 se muestra la velocidad lateral (m/s) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

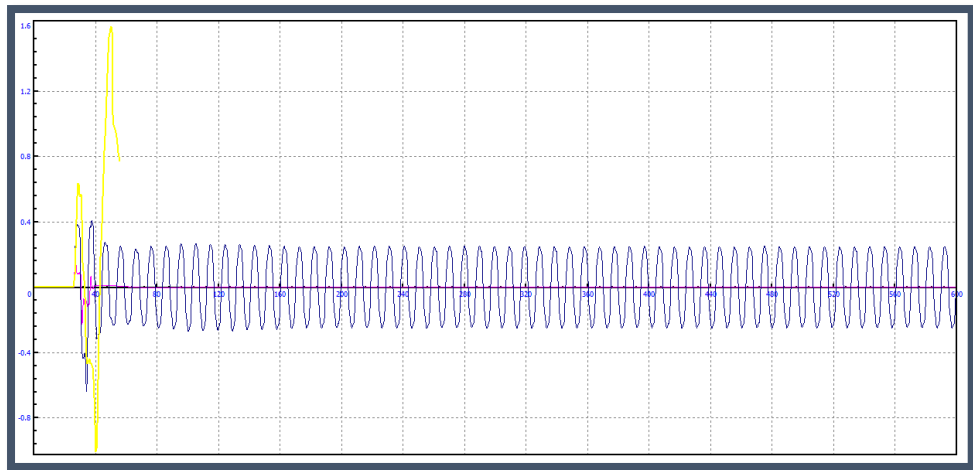


Figura 5.93: Velocidad Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 14.

- **ACELERACIÓN LATERAL:** En la Figura 5.94 se muestra la aceleración lateral (m/s^2) del primer eje de ruedas en función de la distancia recorrida por el tren (m) para 20 m/s (rosa), la velocidad crítica 44 m/s (azul) y 110 m/s (amarillo).

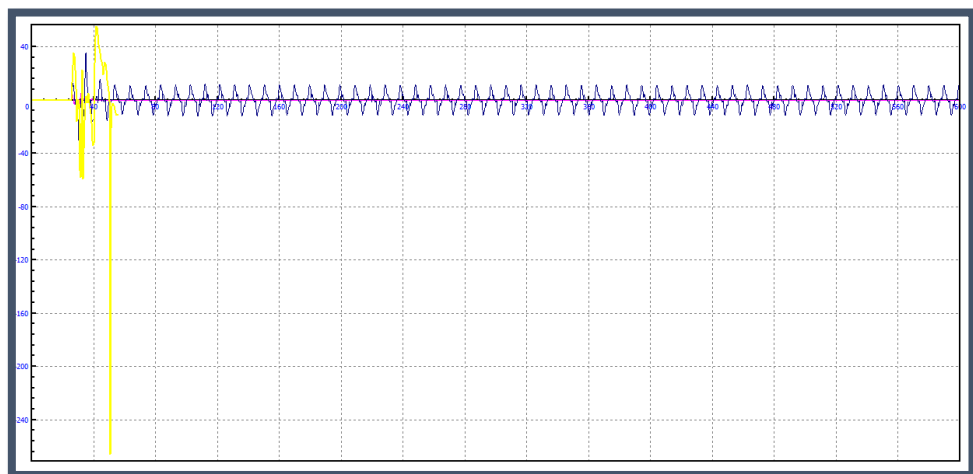


Figura 5.94: Aceleración Lateral VS Distancia Recorrida del Ensayo 14.

- **PLANOS DE FASE:** En la Figura 5.95, Figura 5.96 y Figura 5.97 se muestran los planos de fase para 20 m/s, la velocidad crítica 44 m/s y 110 m/s, respectivamente. El eje “x” representa la posición lateral del vehículo y el eje “y” la velocidad lateral del mismo.

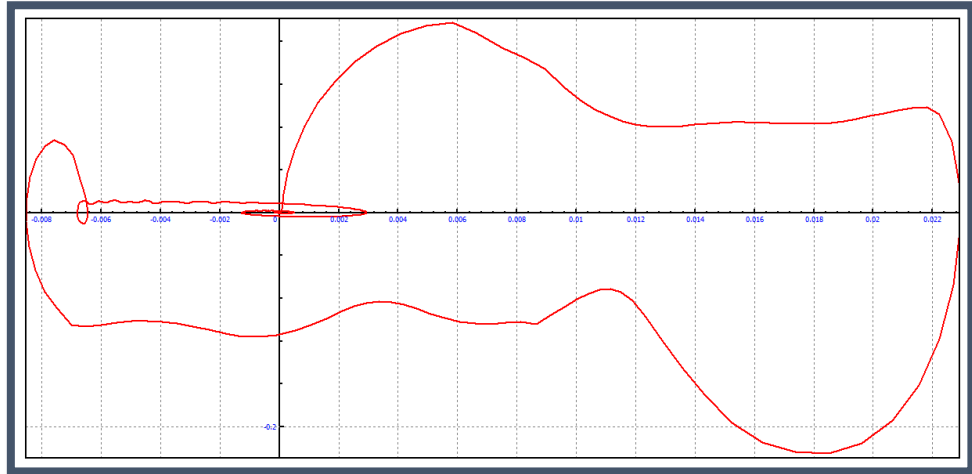


Figura 5.95: Plano de Fase a 20 m/s del Ensayo 14.

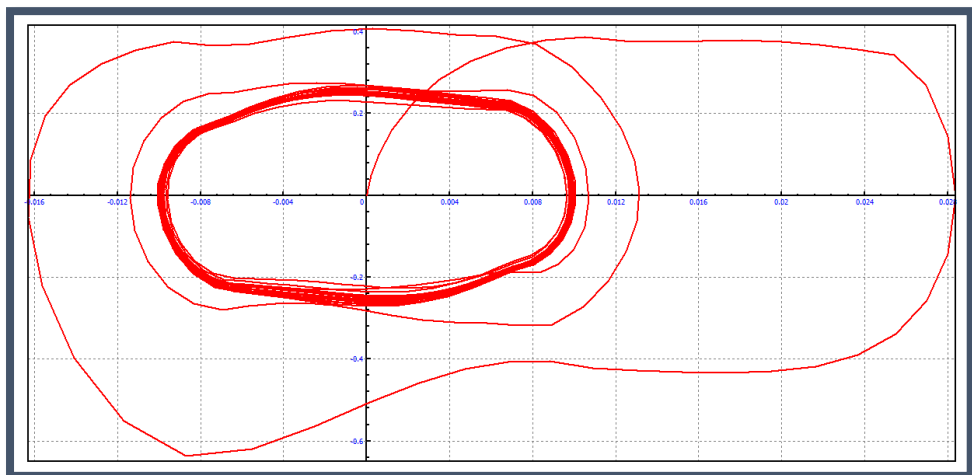


Figura 5.96: Plano de Fase a Velocidad Crítica (43 m/s) del Ensayo 14.

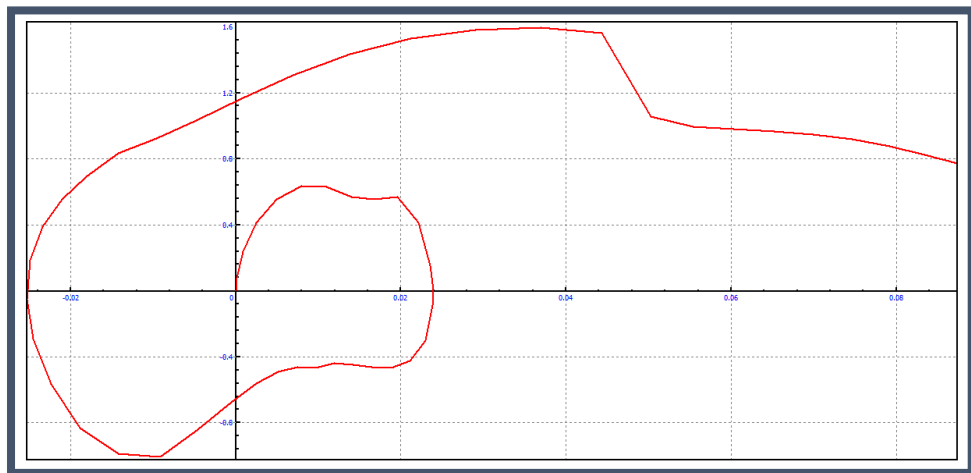


Figura 5.97: Plano de Fase a 110 m/s del Ensayo 14.

- **CURVA DESVIACIÓN DE AMPLITUD LATERAL VS VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN:** En la Figura 5.98 se muestra la desviación típica (en mm) de los valores de posición lateral en función de la velocidad de circulación del tren. De esta manera queda representada la dispersión de los valores de amplitud que se producen para cada velocidad.

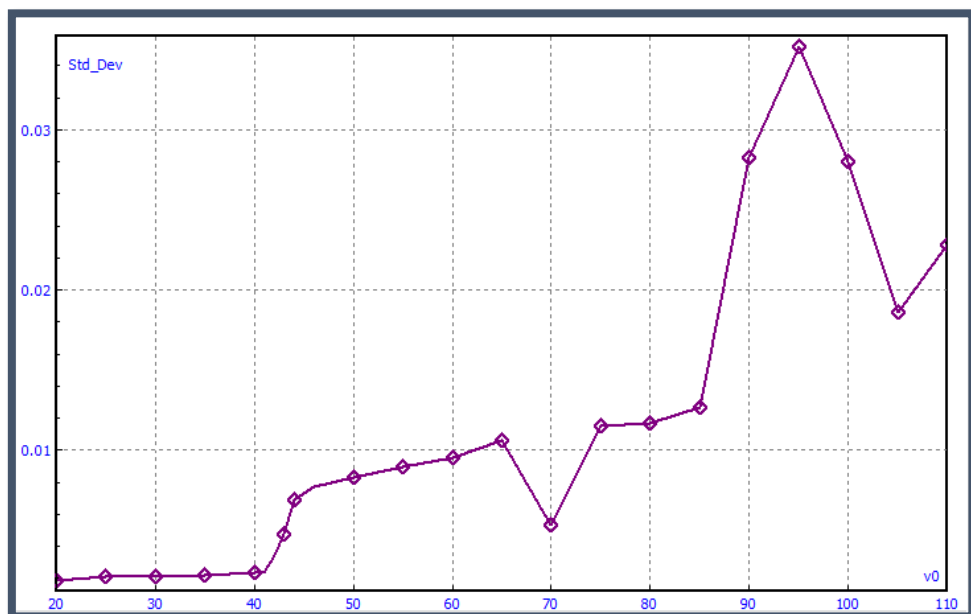


Figura 5.98: Desviación de Amplitud Lateral VS Velocidad del Tren del Ensayo 14.

- **COMENTARIO:**

La velocidad crítica obtenida cuando el coche remolque circula a media carga con los resortes helicoidales trabajando al 130% es de 44 m/s – 158,4 km/h. Esta velocidad es 1 m/s superior a la que se da en el coche remolque con los valores de rigidez vertical originales en los muelles que conforman la suspensión primaria. Por lo tanto, se puede concluir este análisis diciendo que, para los ensayos realizados, a medida que los resortes helicoidales tienen menor rigidez el tren perderá la estabilidad a velocidades inferiores.

En este ensayo el tren va a descarrilar a las velocidades de 90, 95, 100 y 110 m/s. Esto significa que el tren descarrila 10 m/s antes si los muelles de la suspensión trabajan al 130%.

Además, para la velocidad de 110 m/s se obtiene que el descarrilamiento se produce de manera mucho más brusca que en el resto de ensayos y tras haber transcurrido el tren muy poca distancia, tan solo 50 metros. Esto se debe a que la gran rigidez que presenta la suspensión primaria hace que la inercia lateral del tren provocada por la irregularidad de la vía lleve directamente a la salida del vehículo. Este descarrilamiento se puede apreciar en amarillo en la Figura 5.92, la Figura 5.93 y la Figura 5.95; cuando transcurridos los primeros 50 metros se dejan de aportar datos de las variables a estudiar después de que se produzca un gran desplazamiento lateral. En el plano de fase de la Figura 5.97 se aprecia como el descarrilamiento se va a producir hacia la derecha de los carriles apenas iniciada la marcha del tren.

5.15. SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

En este apartado se va a realizar la síntesis de los resultados generales que se han obtenido en los ensayos realizados.

En la Tabla 3 se va a mostrar las velocidades críticas y de descarrilamiento que se han calculado para cada estado de ocupación de pasajeros del tren. Como se puede observar, las velocidades críticas en todos los casos son superiores a los 100 km/h (Velocidad máxima del tren de la Serie 446) y, por tanto, se puede afirmar que este jamás perderá la estabilidad lateral o descarrilará en recta y que su funcionamiento se desarrolla en un rango seguro de velocidades.

En esta tabla se puede observar como a medida que el tren circula con mayor número de pasajeros, este peso extra va a dotarlo de cierta estabilidad añadida y es capaz de desplazarse a una velocidad mayor antes de que se produzca el movimiento de lazo. Para el descarrilamiento, se obtiene que el tren se sale de la vía a una velocidad de 54 km/h menor cuando circula en vacío con respecto a los otros dos casos.

Tabla 3: Velocidades Crítica y de Funcionamiento Según Ocupación.

	VELOCIDAD CRÍTICA	VELOCIDAD DE DESCARRILAMIENTO
TREN EN VACÍO	40 m/s - 144 km/h	85 m/s – 306 km/h
TREN A MEDIA CARGA	43 m/s – 154,8 km/h	100 m/s – 360 km/h
TREN CON MÁXIMA OCUPACIÓN	44 m/s – 158,4 km/h	100 m/s – 360 km/h

En la Figura 5.99 y en la Figura 5.100 se van a mostrar las gráficas que representan la relación de las velocidades críticas y de descarrilamiento con el estado de carga del vehículo, respectivamente.

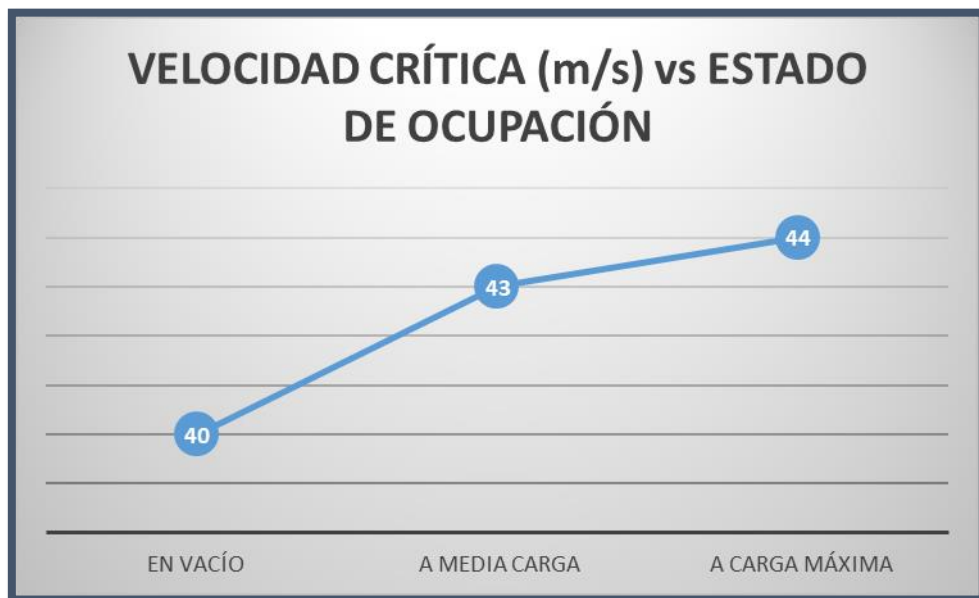


Figura 5.99: Velocidad Crítica VS Estado de Ocupación.

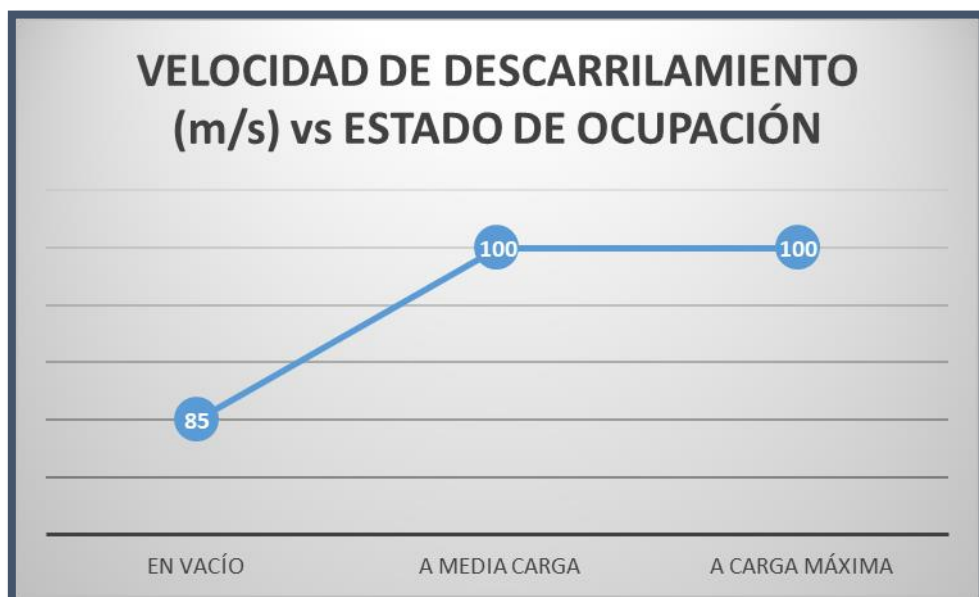


Figura 5.100: Velocidad Descarrilamiento VS Estado de Ocupación.

Como para la realización del estudio se han simulado los diferentes estados de ocupación de cada coche del tren aumentando la carga vertical que se ejerce sobre un mismo bogie, se va a analizar como varía el comportamiento del bogie en función de dicha carga.

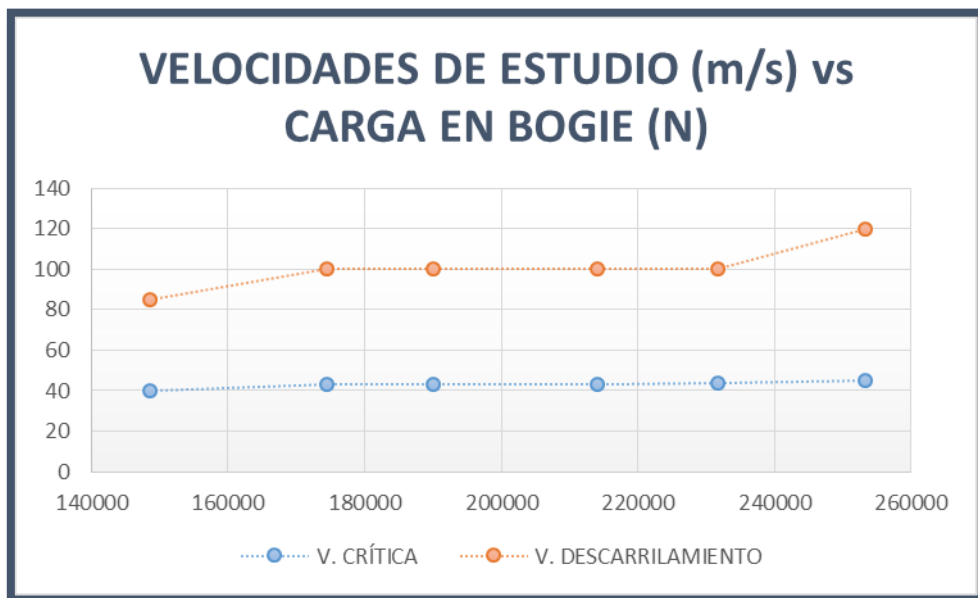


Figura 5.101: Gráfico de Dispersión Velocidades de Estudio (m/s) VS Carga en Bogie (N).



Figura 5.102: Velocidades de Estudio (m/s) VS Carga en Bogie (N).

En la Figura 5.101 se muestran como varían la velocidad crítica y las velocidades mínimas a las que se va producir el descarrilamiento del bogie en función de la carga impuesta. En la Figura 5.102 se representa la misma relación de manera más visual con los valores exactos obtenidos en cada caso para cada parámetro.

A medida que aumenta la carga que soporta el bogie en circulación este será capaz de desplazarse a mayores velocidades por la vía antes de sufrir la pérdida de la estabilidad lateral y, también, antes de que se produzca el descarrilamiento.

Seguidamente se va a analizar cómo ha variado el comportamiento del coche remolque del vehículo cuando circula a media carga a medida que se van variando los parámetros que definen la suspensión primaria del bogie. En la Figura 5.103 se puede observar como variando el valor porcentual del coeficiente de amortiguación de los amortiguadores de la suspensión primaria no se producen cambios significativos en la estabilidad lateral del vehículo. Apenas se consigue aumentar en 1 m/s la velocidad crítica del tren cuando estos trabajan al 130%. Esta falta de variación en los resultados se debe a que los amortiguadores de la suspensión primaria están colocados de tal manera que amortigüen en las direcciones vertical y longitudinal del tren que en la lateral, véase su posición en la Figura 4.16.

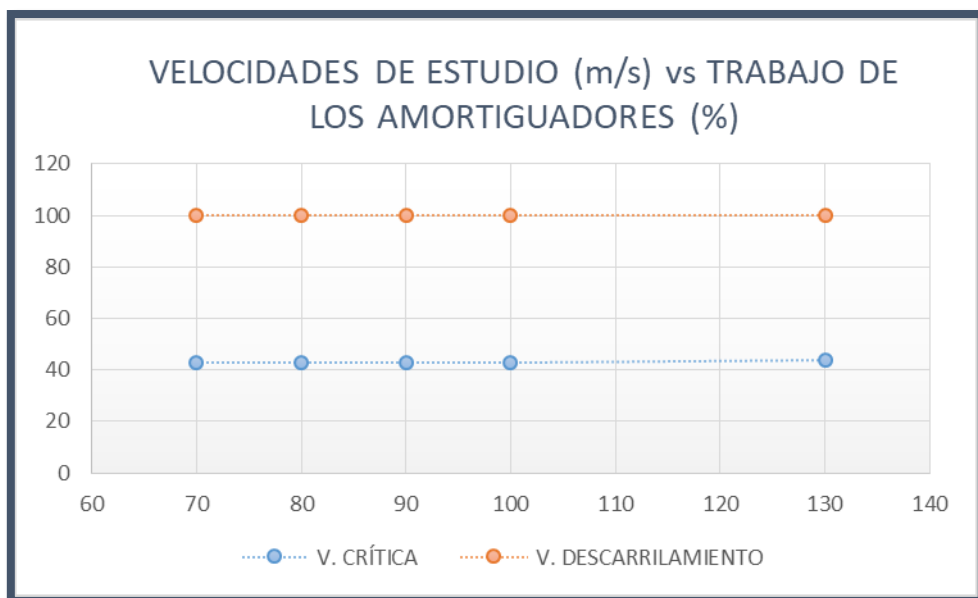


Figura 5.103: Velocidades de Estudio (m/s) VS Trabajo Amortiguadores (%).

A continuación, en la Figura 5.104, se presentan los resultados de las velocidades críticas y de descarrilamiento del coche remolque a media carga para los ensayos en los que se ha realizado una variación porcentual del valor de la constante de rigidez vertical, que define los muelles helicoidales de la suspensión primaria.

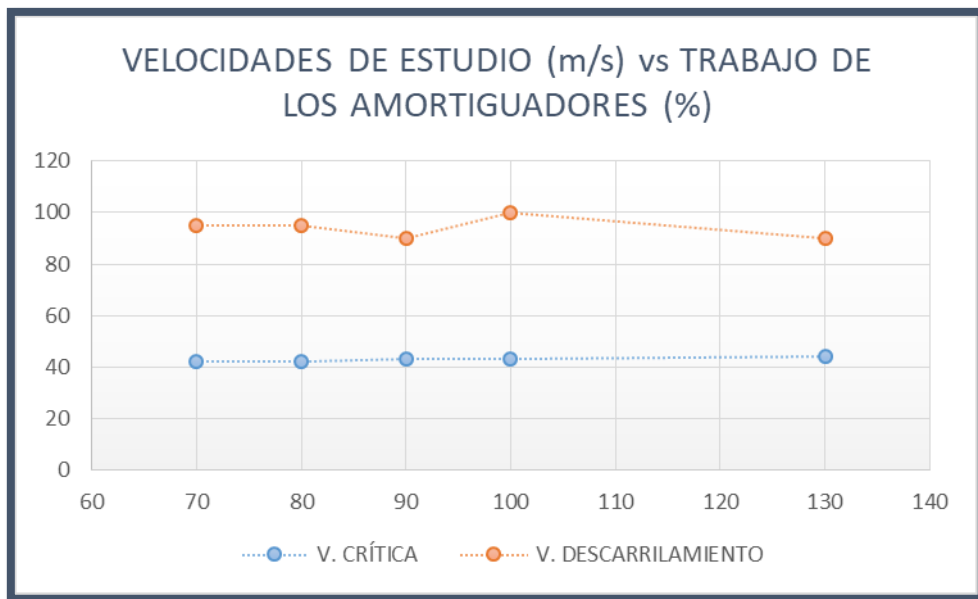


Figura 5.104: Velocidades de Estudio (m/s) VS Trabajo Muelles (%).

En ella se muestra como a medida que la rigidez de los muelles de la suspensión primaria aumenta, también irá aumentando de manera lineal la velocidad a la que puede circular el coche sin perder la estabilidad lateral. Sin embargo, esta relación no se produce en cuanto al descarrilamiento del vehículo. Esto se debe sin duda a que, alcanzada cierta velocidad, el comportamiento lateral del tren se vuelve completamente caótico y prácticamente impredecible, y esto hace que el coche pueda salirse de la vía en cualquier momento.

6. PRESUPUESTO

1. Autor:

Ignacio Álvarez Castrillo.

2. Departamento:

Ingeniería Mecánica.

3. Título del proyecto:

Análisis de la Estabilidad en Recta de un Tren de Cercanías.

4. Duración:

4 meses.

5. Desglose presupuestario:

A la hora de realizar el desglose presupuestario se van a tener en cuenta los gastos generados por el equipo informático, el software informático y el personal empleado. Para calcular el coste del software y los equipos informáticos hay que tener en cuenta que estos sufren una depreciación de su valor original. Para obtenerlo se ha utilizado la ecuación (2), mostrada a continuación:

$$C = \frac{t}{d} \times p \times u \quad (2)$$

En ella:

- C = Coste imputable.
- t = N° de meses que el bien ha sido utilizado.
- d = N° de meses que tarda en depreciarse el bien.
- p = Precio del bien a la hora de ser comprado.
- u = Porcentaje de utilización del bien.

Las Tablas 4,5 y 6 muestran el desglose del cálculo de los costes que suponen el equipo informático, software y personal empleados en la realización del TFM.

Tabla 4: Coste del equipo informático empleado

EQUIPO INFORMÁTICO					
Descripción	Coste (€)	Utilización del producto (%)	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación (meses)	Coste imputable (€)
Ordenador personal	500	85	4	24	70,83
Ordenador de la universidad	1500	30	2	24	37,5
				TOTAL: 108,33 €	

Tabla 5: Coste del software informático empleado

SOFTWARE INFORMÁTICO					
Descripción	Coste (€)	Utilización del producto (%)	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación (meses)	Coste imputable (€)
PTC CREO	3600	33,33	4	12	400
Universal Mechanism	6000	100	4	12	2000
				TOTAL: 2400 €	

Tabla 6: Coste de personal empleado

PERSONAL				
Nombre	Categoría	Coste (€/mes)	Dedicación (meses)	Coste imputable (€)
Ignacio Álvarez Castrillo	Ingeniero Junior	1500	4	6000
TOTAL: 6000 €				

También se van a añadir al cálculo un concepto de costes indirectos que representan los gastos en desplazamiento, dietas,... calculados como un 20% de la suma de los gastos que se producen en personal, software y equipos informáticos. Se aplica un Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) del 21% para obtener el coste total del proyecto, cuyo desglose se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Coste total del proyecto

COSTE TOTAL DEL PROYECTO	
Concepto	Coste imputable (€)
Equipo informático	108,33
Software informático	2400
Personal	6000
Costes indirectos	1701,66
	SUBTOTAL: 10210 €
IVA (21%)	2144,1
	TOTAL: 12354,1 €

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. CONCLUSIONES

Con la realización de este proyecto se han conseguido llevar a cabo con éxito todos los objetivos marcados a su inicio, recogidos en el *Capítulo 1.2*. Se cumple así el objetivo clave del TFM que era el análisis de la estabilidad lateral en recta de un tren de cercanías.

Se logró implementar y simular el comportamiento del tren de cercanías de la Serie 446 de RENFE y se estudió como afectan al vehículo los diferentes estados de ocupación de pasajeros que este puede tener durante su funcionamiento. Los resultados de dicho estudio permiten concluir que, a medida que el bogie del tren soporta una carga vertical mayor, el tren tenderá a perder la estabilidad a velocidades más altas. Por tanto, se podría decir que cuanta mayor sea el número de pasajeros que transporta el tren, la estabilidad lateral será mejor. Gracias a este análisis se ha conseguido averiguar que el tren perderá la estabilidad lateral para cualquier ocupación de pasajeros a velocidades superiores a la velocidad máxima que este puede alcanzar, 100 km/h. Consiguientemente se puede afirmar que al no alcanzar el tren de la Serie 446 la velocidad crítica, este nunca perderá la estabilidad lateral en recta si se encuentra en óptimas condiciones de operatividad.

Se han conseguido hallar, para cada caso de estudio, las velocidades críticas y de descarrilamiento del tren. Estos valores pueden significar un buen punto de partida para la realización de estudios más avanzados de cara a la fabricación o modificación del tren, pero esto no quiere decir que se correspondan de manera completamente fidedigna a los valores que se darían en el modelo real. A la hora de la realización del proyecto se han llevado a cabo algunas simplificaciones sobre la implementación del tren que, sin duda, afectan a los resultados.

Entre las simplificaciones más importantes se encuentra la implementación de las cajas de los coches como si fueran meras fuerzas de peso sobre los bastidores de los bogies, sin tener en cuenta el efecto de la inercia que estos puedan presentar. El desconocimiento de los valores de la matriz de los momentos de inercia de las cajas del tren propició que esta simplificación resultase la más apropiada para la ejecución con éxito del proyecto.

Otra de las simplificaciones que también puede afectar de manera directa a los resultados es que para simular el comportamiento del coche motor no se ha tenido en cuenta el efecto que podría producir la inercia de rotación del motor y de la reductora de los bogies motores en la estabilidad lateral del ferrocarril.

También se ha analizado como afectan los parámetros que definen la suspensión primaria en el comportamiento lateral del tren. Se llegó a la conclusión que el estado de funcionamiento de los amortiguadores de la suspensión primaria no afectará en gran medida a dicho comportamiento, y de que si se aumenta la rigidez de los resortes helicoidales se va a conseguir que el tren sea capaz de circular a una velocidad mayor sin perder la estabilidad. Estos estudios se han realizado para valores de entre el 70% y el 130% de los parámetros del modelo original.

Para el desarrollo del proyecto se ha utilizado el programa Universal Mechanism. UM ha permitido llevar a cabo una simulación de gran complejidad, prácticamente imposible de ser efectuada a través de otros medios. Este software, de utilización y aprendizaje poco amigables, permite el análisis dinámico de una gran variedad de sistemas dinámicos y su gran capacidad de cálculo le otorga una notable utilidad industrial y de investigación.

En las últimas décadas, la creación y mejora de programas que permiten el diseño y el cálculo computacional de sistemas de gran complejidad ha supuesto una revolución tecnológica basada en la optimización de tiempo y dinero.

El presente proyecto permite conocer de manera rápida y económica el comportamiento que va a presentar el tren de la Serie 446. Este estudio puede extrapolarse a otros diseños de trenes previa fabricación para así conseguir optimizar su comportamiento, mejorar sus tiempos de diseño e intentar reducir los costes asociados a la fabricación de prototipos y ensayos físicos que, finalmente, no cumplen con los requisitos y su realización podría haber sido ahorrada de haberse conocido sus fallos de antemano.

7.2. TRABAJOS FUTUROS

En este apartado se van a proponer algunos temas para futuros trabajos que tengan relación o que puedan tomar como antecedente el presente Trabajo Fin de Master. Estos son los siguientes:

- Análisis de la estabilidad en recta de un tren en función de los perfiles de rueda y de los carriles utilizados.
- Análisis de la estabilidad en curva de un tren de cercanías.
- Análisis de la estabilidad en recta de un tren de mercancías.
- Análisis de la estabilidad en recta de un tren de alta velocidad.
- Análisis de la estabilidad en recta y en curva del tren de la serie 446 introduciendo irregularidades en la vía y/o las ruedas.
- Análisis de la respuesta del bogie del tren de la Serie 446 frente a las diferentes irregularidades que pueden darse en las vías.
- Estudio de frenada del tren de la Serie 446.
- Estudio de tracción del tren de la Serie 446.
- Estudio de fatiga en el bastidor del bogie de la Serie 446.
- Realización de este mismo proyecto, diseñando e introduciendo en Universal Mechanism las cajas de los coches del tren con sus respectivos momentos de inercia y elaborando una comparación de resultados.

8. REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASCANTE, R., & XAUBET, D. (2011). *Ingeniería Inversa del Talgo 0*. Barcelona: UPC. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13784/%20Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] EADIC. (12 de Julio de 2016). *Dinámica ferroviaria, un área de conocimiento fundamental para el diseño ferroviario*. Obtenido de EADIC.COM: <https://www.eadic.com/dinamica-ferroviaria-un-area-de-conocimiento-fundamental-para-el-diseno-ferroviario/>
- [3] MOLATEFI, H., HECHT, M., & KADIVAR, M. H. (2006). *Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon*. Shiraz: Shiraz University; TU-Berlin.
- [4] EL PAÍS. (15 de Septiembre de 2017). Objetivo: cero emisiones. *EL PAÍS*. Obtenido de https://elpais.com/economia/2017/09/15/actualidad/1505469172_421840.html
- [5] ÁLVAREZ, A. G. (Enero de 2016). *Unidades eléctricas series 445, 446 y 447*. Obtenido de Vialibre.org: <https://web.archive.org/web/20070927233922/http://www.vialibre-ffe.com/material/pdf/493-ene06.pdf>
- [6] DE LA PRIDA, R. (s.f.). *Apuntes de la asignatura Ingeniería de Vehículos - Tema: Ferrocarriles*. Leganés: UC3M.
- [7] CASTRILLO, I. Á. (2018). *Análisis de las Vibraciones de un Bogie Ferroviario Ante Excitación Genérica*. Leganés: UC3M.

- [8] RENFE. (1989). *Norma Técnica de Mantenimiento - N.T.M. 4461.200.01*.
- [9] LBFoster. (s.f.). *lbfooster.com*. Obtenido de <https://www.lbfooster.com/en/market-segments/rail-technologies/solutions/rail-monitoring>
- [10] UC3M; Madroño. (s.f.). *Limit Cycle*. Obtenido de Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/limit-cycle>
- [11] RUBIO ALONSO, H., & BUSTOS CABALLERO, A. (2019). *Apuntes de la Asignatura de Acústica y Vibraciones - Tema: Vibraciones No Lineales*. Leganés: UC3M.
- [12] RAO, S. S. (2011). *MECHANICAL VIBRATIONS*. Upper Saddle, New Jersey: Prentice Hall.
- [13] PTC. (s.f.). *ptc.com*. Obtenido de <https://www.ptc.com/en/products/cad/creo/parametric>
- [14] Universal Mechanism. (s.f.). *universalmechanism.com*. Obtenido de <http://www.universalmechanism.com/en/pages/index.php?id=1#>
- [15] M.A. REZVANI, A. M. (2017). Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics A/Solids*.
- [16] KONI. (s.f.). *Endurance Line*. Obtenido de koni.com: <http://www.koni.com/en-US/Railway/Products/suspension-dampers/endurance-line/>
- [17] NIETO, S. (2003). ¿Es usted el típico español medio? *EL MUNDO MAGAZINE*.